

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Tomas Burokas

**SUPERPLAČIAJUOSČIŲ LĖTINIMO IR KREIPIMO SISTEMŲ
MODELIAVIMAS IR ANALIZĖ**

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai T000, Elektros ir elektronikos inžinerija 01T

Vilnius, 2006

Disertacija rengta 2002-2006 m. Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Mokslinis vadovas

prof. habil. dr. Stanislovas ŠTARAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai T000, elektros ir elektronikos inžinerija 01T).

TURINYS

PAGRINDINIAI ŽYMENYS.....	6
ĮVADAS.....	7
1 skyrius LITERATŪROS APŽVALGA IR UŽDAVINIŲ FORMULAVIMAS.....	14
1.1 Naujų lėtinimo ir kreipimo sistemų konstrukcijų apžvalga.....	14
1.2 Elektronų pluošto kreipimo lėtinimo ir kreipimo sistemose ir bėgančiosios bangos elektroniniuose vamzdžiuose analizė.....	20
1.3 Elektrodinaminių lėtinimo ir kreipimo sistemų analizės metodai.....	21
1.4 Darbo tikslas ir sprendžiami uždaviniai.....	25
2 skyrius BĖGANČIOSIOS BANGOS ELEKTRONINIŲ VAMZDŽIŲ IR JŲ SIGNALINIŲ TRAKTŲ DINAMINIŲ CHARAKTERISTIKŲ TOBULINIMO GALIMYBIŲ ANALIZĖ	27
2.1 Bėgančiosios bangos elektroninių vamzdžių ir jų signalinių traktų dinaminių charakteristikų tobulinimo galimybės.....	27
2.1.1 Dispersijos įtaka.....	28
2.1.2 Slopavimo įtaka.....	30
2.1.3 Banginės varžos kitimo įtaka.....	31
2.1.4 Kreipiančiojo elektrinio lauko įtaka.....	34
2.1 Elektronų pluošto kreipimo skaičiavimas ir netiesinių iškreipymų analizė.....	36
2.2.1 Kreipiančiojo elektrinio lauko pasiskirstymas.....	36
2.2.2 Elektronų pluošto kreipimo apskaičiavimas.....	39
2.2.3 Harmoninių virpesių formos iškreipimai nesimetrinėje spiralinėje lėtinimo ir kreipimo sistemoje.....	40
2.2.4 Netiesinių iškreipymų mažinimo galimybės.....	42
2.3 Elektrinio lauko skersinės dedamosios priklausomybės nuo skersinės koordinatės įtaka elektroninio vamzdžio pereinamajai charakteristikai.....	43
2.3.1 Pereinamosios charakteristikos skaičiavimo metodika.....	43
2.3.2 Pereinamųjų charakteristikų skaičiavimas ir analizė.....	46
2.4 Išvados.....	50
3 skyrius KVAZISIMETRINĖS KONSTRUKCIJOS LĖTINIMO IR KREIPIMO SISTEMOS MODELIS IR SAVYBIŲ ANALIZĖ.....	52
3.1 Kvazisimetrinės konstrukcijos lėtinimo ir kreipimo sistema ir jos modelis.....	52
3.1.1 Kvazisimetrinės konstrukcijos lėtinimo ir kreipimo sistemos modelis.....	52

3.1.2 Alternatyvus slopinimo įvertinimo būdas.....	55
3.2 Kvazisimetrinės konstrukcijos lėtinimo ir kreipimo sistemos analizė.....	56
3.3 Išvados.....	59
4 skyrius DVIPRADĖS SPIRALINĖS LĖTINIMO IR KREIPIMO SISTEMOS	
MODELIŲ SUDARYMAS IR SAVYBIŲ ANALIZĖ.....	60
4.1 Dvipradė spiralinės lėtinimo ir kreipimo sistema, jos modelis ir savybių analizė.....	60
4.1.1 Dvipradės spiralinės lėtinimo ir kreipimo sistemos modelis.....	60
4.1.2 Dvipradės spiralinės lėtinimo ir kreipimo sistemos savybės.....	63
4.2 Elektrinis laukas dvipradėje spiralinėje lėtinimo ir kreipimo sistemoje.....	64
4.2.1 Dvipradės spiralinės lėtinimo ir kreipimo sistemos elektrinio lauko analizė.....	64
4.2.2 Dvipradžių spiralinių lėtinimo ir kreipimo sistemų skaičiavimo rezultatai ir jų aptarimas.....	66
4.3 Dvipradė spiralinė lėtinimo ir kreipimo sistema su vidiniu ekranu, jos modelis ir savybių analizė.....	70
4.3.1 Dvipradės spiralinės lėtinimo ir kreipimo sistemos su skirtingu ir pastoviu spiralių pločiu modelis.....	70
4.3.2 Dvipradės spiralinės lėtinimo ir kreipimo sistemos su kintamu spiralių pločiu modelis.....	72
4.3.3 Dvipradžių spiralinių lėtinimo ir kreipimo sistemų su vidiniu ekranu skaičiavimo rezultatai ir jų aptarimas.....	74
4.4 Išvados.....	75
5 skyrius NEVIENALYČIŲ LĖTINIMO IR KREIPIMO SISTEMŲ MODELIŲ	
SUDARYMAS IR SAVYBIŲ ANALIZĖ.....	77
5.1 Nevienalyčių spiralinių lėtinimo ir kreipimo sistemų savybės.....	78
5.1.1 Nevienalytės spiralinės lėtinimo ir kreipimo sistemos modelis.....	78
5.1.2 Skaičiavimo rezultatai ir jų analizė.....	80
5.2 Laikiklių įtaka spiralinių ir meandrinių sistemų savybėms.....	82
5.2.1 Spiralinės sistemos modelis.....	82
5.2.2 Meandrinės sistemos modelis.....	84
5.2.3 Skaičiavimo rezultatai ir jų analizė.....	85
5.3 Lėtinimo ir kreipimo sistemų ir jų jungių modeliavimas bei tobulinimas.....	88
5.3.1 Signalinio trakto modelis.....	88
5.3.2 Skaičiavimų rezultatai ir jų analizė.....	92
5.4 Signalinių traktų ir lėtinimo ir kreipimo sistemų tobulinimas.....	95
5.5 Išvados.....	97

6 skyrius NEVIENALYČIŲ LOVELINIŲ LĖTINIMO IR KREIPIMO SISTEMŲ MODELIŲ SUDARYMAS IR SAVYBIŲ ANALIZĖ.....	98
6.1 Nevienalyčių lovelinių lėtinimo ir kreipimo sistemų savybės.....	99
6.1.1 Spiralinės sistemos modelis.....	99
6.1.2 Meandrinės sistemos modelis.....	100
6.1.3 Lėtinimo koeficiento ir įėjimo varžos skaičiavimo rezultatai ir jų analizė.....	101
6.1.4 Skersinio elektrinio lauko skaičiavimo rezultatai ir analizė.....	107
6.2 Nevienalytės lovelinės spiralinės lėtinimo ir kreipimo sistemos analizė automatizuoto projektavimo programa.....	105
6.2.1 Vienalytės ir nevienalytės lovelinių spiralinių lėtinimo ir kreipimo sistemų modeliai.....	105
6.2.2 Lovelinių spiralinių lėtinimo ir kreipimo sistemų tyrimas.....	107
6.3 Išvados.....	110
DARBO REZULTATŲ APIBENDRINIMAS.....	111
KITŲ AUTORIŲ LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	114
AUTORIAUS PUBLIKACIJŲ SĄRAŠAS.....	122
PRIEDAI.....	123
1 priedas. Banginių varžų skaičiavimo programa.....	123
2 priedas. Elektronų pluošto kreipimo ir BBEV statinio jautrumo skaičiavimo programa.....	129
3 priedas. BBEV su nesimetrine sistema pereinamųjų charakteristikų skaičiavimo programa....	131
4 priedas. BBEV su simetrine sistema pereinamųjų charakteristikų skaičiavimo programa.....	135
5 priedas. Kvazisimetrinės spiralinės sistemos savybių tyrimo programa.....	139
6 priedas. Dvipradės spiralinės sistemos elektrinio lauko tyrimo programa.....	143
7 priedas. Dvipradės spiralinės sistemos su pastovaus pločio spiralėmis savybių tyrimo programa.....	148
8 priedas. Dvipradės spiralinės sistemos su kintančio pločio spiralėmis savybių tyrimo programa.....	150
9 priedas. Laikiklių įtakos įvertinimo meandrinės sistemos savybėms tyrimo programa.....	154
10 priedas. Laikiklių įtakos įvertinimo spiralinės sistemos savybėms tyrimo programa.....	158
11 priedas. Nevienalyčių lovelinių meandrinių sistemų savybių tyrimo programa.....	161
12 priedas. Vienalyčių lovelinių meandrinių sistemų savybių tyrimo programa.....	164
13 priedas. Vienalyčių lovelinių spiralinių sistemų savybių tyrimo programa.....	167
14 priedas. Lovelinių sistemų elektrinio lauko tyrimo programa.....	169
15 priedas. Lovelinių spiralinių sistemų savybių tyrimo programa.....	176
PADĖKA.....	179

Pagrindiniai žymenys

c_0 - šviesos greitis;
 d - laidininko plotis;
 e - elektrono krūvis;
 E - kreipiančiojo elektrinio lauko stiprumas žemų dažnių srityje;
 f - dažnis;
 H - elektronų pluošto poslinkis ekrane;
 k - bangos skaičius;
 k_L - lėtinimo koeficientas;
 k_{Lk} - konstrukcinis lėtinimo koeficientas;
 L - daugialaidės linijos žingsnis, spiralės žingsnis, pusė meandro žingsnio;
 L_s - lėtinimo ir kreipimo sistemos ilgis;
 l - tarpas tarp gretimų daugialaidės linijos, spiralės ar meandro laidininkų;
 m - elektrono masė;
 p - spiralės ar meandro laidininko storis, daugialaidės linijos laidininko storis;
 T - normuotoji pereinamoji charakteristika;
 t_0 - fazės vėlinimo trukmė žemų dažnių srityje;
 t_e - elektrono lėkio nuo lėtinimo ir kreipimo sistemos galo iki vamzdžio ekrano trukmė;
 t_s - elektrono lėkio lėtinimo ir kreipimo sistema trukmė;
 t_v - vėlinimo trukmė lėtinimo ir kreipimo sistemoje;
 U_0 - greitimo įtampa;
 U_m - tiriamo signalo įtampos amplitudė, kreipimo įtampos amplitudė;
 v_f - fazinis elektromagnetinės bangos greitis lėtinimo ir kreipimo sistemos išilginės ašies kryptimi;
 Z_{IN} - lėtinimo ir kreipimo sistemos įėjimo varža;
 $Y(\theta)$ - lėtinimo ir kreipimo sistemos banginis laidumas;
 y_0 - pradinė elektronų pluošto koordinatė;
 w - tarpas tarp lėtinimo ir kreipimo sistemos kreipimo elektrodų;
 α - slopinimas lėtinimo ir kreipimo sistemoje;
 θ - fazės kampas, fazės skirtumas tarp gretimų laidininkų įtampų ar srovių;
 τ - lėkio trukmė lėtinimo ir kreipimo sistemos žingsnyje, vijoje, elementarioje lėtinimo ir kreipimo sistemoje;
 τ_v - vėlinimo trukmė lėtinimo ir kreipimo sistemos žingsnyje, vijoje, elementarioje lėtinimo ir kreipimo sistemoje;
 ω - kampinis dažnis

Ivadas

Mokslo problemos aktualumas. Superplaciajuostėmis elektrodinaminėmis lėtinimo sistemomis vadinami paskirstytųjų parametrų įtaisai, kuriuose elektromagnetinės bangos fazės sklaidimo greitis yra daug mažesnis už šviesos greitį plačiame dažnių diapazone.

Superplaciajuostės elektrodinaminės lėtinimo ir kreipimo sistemos plačiai taikomos šiuolaikinėje elektroninėje aparatūroje, radiotechninėse sistemose [1-59]. Superplaciajuostės elektrodinaminės lėtinimo sistemos taikomos didesnės galios bėgančiosios bangos mikrobanginių virpesių stiprintuvuose [9-13, 51, 52], generatoriuose [48], analoginiuose skaitmeniniuose keitikliuose [35-40], kaip antenos – ryšių technikoje [35-37], taip pat taikomos matavimo prietaisuose [5, 47]. Pastaruoju metu tokios sistemos taikytos protonų pluoštui kreipti SNS tipo (*Spallation Neutron Source*) projektuose [17-20]. Bėgančiosios bangos lėtinimo ir kreipimo sistemos plačiai taikomos placiajuosčiuose bėgančiųjų bangų osciloskopiniuose vamzdžiuose elektronų pluoštui kreipti, t.y. oscilografuose, impulsų parametrų matuokliuose ir kituose prietaisuose, skirtuose sparčių vienkartinių procesų tyrimui [1-8, 44-47]. Jose elektronų pluoštą kreipia lėtinimo ir kreipimo sistemoje tiriamojo signalo sužadinta elektromagnetinės bangos skersinė elektrinio lauko dedamoji.

Atsižvelgiant į lėtinimo ir kreipimo sistemų atliekamą funkciją yra formuluojami reikalavimai jų parametrams. Kai lėtinimo ir kreipimo sistema naudojama elektronų pluoštui kreipti placiajuosčiuose bėgančiosios bangos osciloskopiniuose vamzdžiuose, reikalaujama, kad šia sistema sklindančios kreipiančiosios elektromagnetinės bangos greitis būtų lygus elektronų greičiui. Projektuojant lėtinimo ir kreipimo sistemas, svarbu užtikrinti leistinas elektromagnetinės bangos fazinio greičio dispersijos, banginės varžos nuokrypas, leistiną slopinimą, kiek įmanoma sumažinti elektrinio lauko skersinės dedamosios priklausomybę nuo dažnio ir skersinės lėtinimo ir kreipimo sistemos koordinatės. Norint praplėsti darbinių dažnių diapazoną link aukštesnių dažnių, reikia mažinti lėtinimo ir kreipimo sistemos matmenis, todėl tobulinama lėtinimo ir kreipimo sistemų konstrukcinių elementų gamybos technologija [60].

Lėtinimo ir kreipimo sistemos yra spiralinės, meandrinės, lovelinės. Priklausomai nuo keliamų reikalavimų lėtinimo ir kreipimo sistemoms, projektuojamos įvairių konstrukcijų ir modifikacijų spiralinės ir meandrinės sistemos. Jos gali būti simetrinės ir nesimetrinės, vienalytės ir nevienalytės, spiralinės sistemos būna vienos ir dviejų spiralių. Dažniausiai sutinkamos cilindrinės spiralinės sistemos. Jos gali būti apvalios, elipsinės ar ištęsto stačiakampio formų.

Yra sukurta daug lėtinimo ir kreipimo sistemų analizės metodų, charakteristikų skaičiavimo algoritmų ir juos realizuojančių programų.

Lėtinimo ir kreipimo sistemų analizei gali būti taikomi analitiniai ir skaitmeniniai analizės metodai. Lėtinimo ir kreipimo sistemų modeliavimui naudojami analitiniai elektrodinaminis ir daugialaidžių linijų metodai. Analitinis elektrodinaminis metodas turi trūkumų: elektrodinaminis sistemos modelis neįvertina laidininko vijos storio ir pločio. Taip pat analitiniai metodai reikalauja didelio ir kruopštaus darbo matematiniam modeliavimui ir analitinių išraiškų išvedimui. Ypatingai ilgai trunka sudėtingesnės konstrukcijos sistemos dispersinės lygties išvedimas.

Vystantis technologijoms bei didėjant asmeninių kompiuterių veikimo spartai mikrobangų įtaisų analizei vis dažniau taikomi skaitmeniniai metodai. Paminėtini yra baigtinių skirtumų, baigtinių elementų, momentų, baigtinių skirtumų laiko srities metodai. Lėtinimo ir kreipimo sistemų analizei vis dažniau taikomi elektromagnetinių laukų skaičiavimo skaitmeniniai metodai [14, 61-94], automatizuoto projektavimo programiniai paketai [12, 14, 24, 30, 61, 64, 95-128]. Paminėtini automatizuoto projektavimo programiniai paketai, skirti mikrobangų įtaisų tyrimui, yra *Argus* [22, 111], *HFSS* [14, 95, 98, 111], *MAFIA* [14, 24, 25, 102, 104, 115], *XFDTD* [120], *CST Microwave Studio* [14, 95, 98, 99, 104, 119]. Automatizuoto projektavimo programinių paketų taikymas palengvina ir supaprastina lėtinimo ir kreipimo sistemų analizę, nors kartais, priklausomai nuo sistemos konstrukcijos sudėtingumo, skaičiavimo trukmė gali būti ne maža (nuo kelių iki keliolikos valandų). Be to, automatizuoti paketai atskleidžia daugelio veiksnių bendrą įtaką, o atskirų veiksnių, būtinų tinkamai ištirti lėtinimo ir kreipimo sistemas, įtakos tyrimas komplikotas.

1965 metais elektrodinaminės vėlinimo ir lėtinimo ir kreipimo sistemos pradėtos sistemingai tirti Lietuvoje, Kauno politechnikos instituto Vilniaus filiale (dabar Vilniaus Gedimino technikos universitetas) prof. Z. Vainorio suburtoje mokslininkų grupėje. Per keturis dešimtmečius Z. Vainorio mokykla sistemingai tyrė elektrodinamines vėlinimo bei lėtinimo ir kreipimo sistemas, sukūrė tvirtą teorinį pagrindą ir daugeliu teorinių ir praktinių pasiekimų pirmavo pasaulyje. Šioje mokykloje dirbančių profesorių R. Kirvaičio, R. Martavičiaus, J. Skudučio, J. Stankūno, S. Štaro, Z. Vainorio darbai įvertinti Lietuvos Mokslo premijomis. Šioje srityje taip pat dirbo ir prisidėjo prie vėlinimo bei lėtinimo ir kreipimo sistemų tobulinimo V. Daškevičius, A. Gurskas, A. Jurjevas, A. Kleiza, K. J. Maceika, V. Mališauskas, V. Urbanavičius ir kiti. Kita vertus, dar yra spręstinių klausimų tobulinant lėtinimo ir kreipimo sistemų modelius, analizės metodikas. Be to, tobulėjant

lėtinimo ir kreipimo sistemų analizės metodams, atsiranda naujų galimybių, leidžiančių tiksliau įvertinti sistemų savybes įtakojančius veiksnius. Šiai problemai spręsti dideles galimybes suteikia šiuolaikiniai skaitmeniniai metodai, bei šiuolaikinės skaičiavimo technikos galimybės.

Vystantis technologijoms tobulėja ir elektrinių signalų atvaizdavimo ir tyrimo prietaisai. Pastaraisiais metais ypač tobulėja skaitmeniniai oscilografai, jų savybės kasmet tobulėja: plečiasi darbinių dažnių diapazonas, mažėja atvaizdavimo klaidų kiekis, mažėja pereinamosios charakteristikos kilimo trukmė. Pradedant šį darbą, skaitmeninių oscilografų praleidžiamų dažnių diapazonas siekė 5 GHz. Šiuo metu, pavyzdžiui, Tektronix firmos DSO (*Digital Storage Oscilloscope*) tipo TDS6000 serijos oscilografai gali tirti signalus net iki 15 GHz. Deja, šiuo metu tokie oscilografai yra labai brangūs. Tuo tarpu analoginė oscilografija turi savo vietą rinkoje ir šiandien dėl paprastesnio oscilografų valdymo ir mažesnės kainos. Kadangi analoginiuose oscilografuose naudojamų bėgančiosios bangos elektroninių vamzdžių ir lėtinimo ir kreipimo sistemų potencinės galimybės dar nepakankamai ištirtos, aktualu spręsti dar neišspręstus klausimus, tobulinti lėtinimo ir kreipimo sistemų modeliavimo ir analizės metodus, nagrinėti mažai nagrinėtų sistemų variantų savybes, išrinkti perspektyviausius lėtinimo ir kreipimo sistemų variantus.

Darbo tikslas. Tirti nepakankamai nagrinėtų elektrodinaminių superplėčiąjuosčių lėtinimo ir kreipimo sistemų variantus, sudaryti jų modelius, tobulinti analizės metodus, analizuoti savybes, atskleisti bėgančiosios bangos elektroninių vamzdžių bei lėtinimo ir kreipimo sistemų potencines galimybes.

Darbo uždaviniai:

1. Tobulinti netiesinių iškraipymų įvertinimo bėgančiosios bangos elektroniniuose vamzdžiuose metodiką ir atskleisti netiesinių iškraipymų mažinimo galimybes.
2. Sudaryti mažai nagrinėtų lėtinimo ir kreipimo sistemų variantų modelius ir ištirti lėtinimo ir kreipimo sistemų savybes.
3. Atskleisti periodinių netolygumų įtaką lėtinimo ir kreipimo sistemų savybėms, modeliuoti ir analizuoti jungių įtaką lėtinimo ir kreipimo sistemų ir bėgančiosios bangos elektroninių vamzdžių savybėms.
4. Atlikti bėgančiosios bangos elektroninių vamzdžių bei lėtinimo ir kreipimo sistemų potencinių galimybių analizę, parenkant lėtinimo ir kreipimo sistemų variantus, leidžiančius užtikrinti bėgančiosios bangos elektroninių vamzdžių plačią praleidžiamų dažnių juosta ir aukštą veikimo spartą.

Mokslinis naujumas ir praktinė nauda. Sudaryti mažai tirtų lėtinimo ir kreipimo sistemų modeliai, ištirtos jų savybės. Remiantis analize ir modeliavimu nustatyti lėtinimo ir kreipimo sistemų variantai, leidžiantys užtikrinti bėgančiosios bangos elektroninių vamzdžių plačiausią praleidžiamų dažnių juostą ir didžiausią veikimo spartą.

Papildžius *Matlab PDE Tools* programinį paketą, daugialaidžių linijų banginių varžų skaičiavimui taikytas baigtinių elementų metodas.

Patobulinta elektroninių vamzdžių su simetrinėmis ir su nesimetrinėmis lėtinimo ir kreipimo sistemomis pereinamųjų charakteristikų skaičiavimo metodika ir pateikti pereinamųjų charakteristikų skaičiavimo ir analizės rezultatai. Skaičiuojant pereinamąsias charakteristikas įvertintos jos formos ir kilimo trukmės priklausomybės nuo zondojojančio įtampos šuolio, jo poliškumo, pradinės trajektorijos, pradinio poslinkio įtampos ir lėtinimo ir kreipimo sistemos tipo.

Sudarytas kvazisimetrinės spiralinės lėtinimo ir kreipimo sistemos modelis, skirtas nagrinėti užtrumpintų vijų įtaką sistemos lėtinimo koeficientui, įėjimo varžai ir slopinimui. Išvesta tokios sistemos dispersinė lygtis. Atskleistos kvazisimetrinės konstrukcijos lėtinimo ir kreipimo sistemos lėtinimo koeficiento, įėjimo varžos ir slopinimo priklausomybės nuo dažnio.

Sudarytas dvipradės spiralinės konstrukcijos lėtinimo ir kreipimo sistemos modelis. Išvestos dispersinės lygtys. Ištirtos dvipradžių spiralinių lėtinimo ir kreipimo sistemų savybės. Patobulinta dvipradės spiralinės lėtinimo ir kreipimo sistemos konstrukcija papildomai įdėjus vidinį ekraną. Sudaryti dvipradės spiralinės sistemos su vidiniu ekranu modeliai, išvestos dispersinės lygtys ir ištirtos jų savybės. Taikant baigtinių skirtumų metodą ištirtas elektrinis laukas dvipradėje spiralinėje lėtinimo ir kreipimo sistemoje ir palygintas su elektriniu lauku vienpradėje spiralinėje sistemoje.

Sudarytas spiralinės lėtinimo ir kreipimo sistemos modelis, leidžiantis atskleisti nevienalytiškumo, atsirandančio dėl spiralinių laidininkų matmenų kitimo išilgai vijos, įtaką sistemos savybėms. Išvesta dispersinė lygtis ir ištirtos lėtinimo koeficiento ir įėjimo varžos priklausomybės nuo dažnio.

Sudarytas modelis, leidžiantis įvertinti dielektrinių laidininkų laikiklių įtaką nesimetrinių spiralinių ir meandrinių lėtinimo ir kreipimo sistemų savybėms. Išvestos dispersinės lygtys ir skaičiuotos lėtinimo koeficiento ir įėjimo varžos priklausomybės nuo dažnio.

Nagrinėjama plačiajuosčių traktų ir lėtinimo ir kreipimo sistemų jungių įtaka signalinių traktų ir bėgančiosios bangos elektroninių vamzdžių dažninėms ir pereinamosioms charakteristikoms. Sudaryta uždaviniui spręsti tinkama signalinio trakto ekvivalentinės grandinės schema. Pasinaudojant daugkartinių atspindžių diagrama, išvestos atspindžio koeficientų ir perdavimo funkcijų išraiškos. Gautos banginės varžos ir amplitudės dažninės charakteristikos bei pereinamosios charakteristikos.

Sudaryti nevienalyčių lovelinių spiralinių ir meandrinių lėtinimo ir kreipimo sistemų modeliai, ištirtos jų savybės. Skačiuotos lovelinių lėtinimo ir kreipimo sistemų lėtinimo koeficiento, įėjimo varžos priklausomybės nuo dažnio. Baigtinių elementų metodu nagrinėjamas elektrinis laukas lovelinėse lėtinimo ir kreipimo sistemose.

Pasinaudojant automatizuoto projektavimo trimačio modeliavimo programiniu paketu *CST Microwave Studio*, sudarytas spiralinės ir spiralinės lovelinės lėtinimo ir kreipimo sistemų modeliai, ištirtos amplitudės, įėjimo varžos ir vėlinimo laiko dažninės charakteristikos.

Tyrimų metodika. Darbe panaudoti kompiuterinio modeliavimo principai. Pasiūlyti nepakankamai nagrinėtų sudėtingų lėtinimo ir kreipimo sistemų variantų modeliai, jų analizei darbe naudotas daugialaidžių linijų metodas. Siekiant padidinti skaičiavimų tikslumą, potencialų pasiskirstymui daugialaidės linijos skerspjūvyje nustatyti, elektrinio lauko analizei, daugialaidės linijos banginių varžų skaičiavimui naudoti skaitmeniniai baigtinių skirtumų ir baigtinių elementų metodai. Skaitmeniniai metodai taikyti dispersinių lygčių sprendimui, elektronų trajektorijų, bėgančiosios bangos elektroninių vamzdžių charakteristikų skaičiavimui bei signalų formos tiesinių ir netiesinių iškreipymų tyrimui.

Rezultatams papildyti taikytas automatizuoto projektavimo programinis paketas *CST Microwave Studio*.

Gauti rezultatai apibendrinami ir lyginami su kitų autorių rezultatais.

Gynimui pateikiama:

1. Kreipiančiojo elektrinio lauko analizės, netiesinių iškreipymų bėgančiosios bangos elektroniniuose vamzdžiuose įvertinimo ir bėgančiosios bangos elektroninių vamzdžių pereinamųjų charakteristikų skaičiavimo metodika.
2. Kvazisimetrinės ir dvipradės spiralinių lėtinimo ir kreipimo sistemų analizės metodika, modeliai, dispersinės lygtys ir analizės rezultatai.
3. Nevienalyčių spiralinių, meandrinių, lovelinių lėtinimo ir kreipimo sistemų modeliai, dispersinės lygtys ir analizės rezultatai.
4. Oscilografinių bėgančiosios bangos elektroninių vamzdžių ir lėtinimo ir kreipimo sistemų potencinių galimybių analizės rezultatai.

Darbo aprobacija ir publikacijos. Pagrindiniai disertacinio darbo rezultatai buvo paskelbti šiose technologijos mokslo konferencijose bei seminaruose:

- Tarptautinėje ir respublikinėje konferencijoje „Elektronika“, Vilnius, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006 metai.

- Respublikinėje jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Elektronika ir elektrotechnika“, Vilnius, 2001, 2005 metai.
- The 8th Biennial Baltic Electronics Conference „BEC’2002“, Tallinn, 2002.
- The XIV International Conference on Electromagnetic Disturbances, “EMD’2004”, Vilnius, 2004.
- International Scientific Conference „UNITECH’04“, Gabrovo, 2004.
- The XV International Conference on Electromagnetic Disturbances, “EMD’2005”, Bialystok, 2005.
- The International Conference on „Computer as a Tool“ „EUROCON 2005“, Belgrade, 2005.
- The International Conference „Mikon 2006“, Krokovoje, 2006.

Disertacijos tema paskelbta 16 mokslo darbų, iš kurių 1 – straipsnis užsienio technikos IEEE žurnale „Transactions on Electron Devices“ įrašytame į ISI Masterlist sąrašą, 8 – straipsniai technologijos mokslo srities elektros ir elektronikos inžinerijos mokslo krypties žurnaluose, 7 – konferencijų leidiniuose.

Darbo struktūra ir apimtis. Disertaciją sudaro įvadas, šeši skyriai, darbo rezultatų apibendrinimas, kitų autorių ir autoriaus literatūros sąrašai ir priedai.

Pirmajame skyriuje atlikta literatūros analizė, aptartos lėtinimo ir kreipimo sistemų konstrukcijos, atlikta elektronų pluošto kreipimo lėtinimo ir kreipimo sistemose ir bėgančiosios bangos elektroniniuose vamzdžiuose analizė, apžvelgti elektrodinaminių lėtinimo ir kreipimo sistemų analizės metodai bei suformuluoti darbo uždaviniai.

Antrajame skyriuje apžvelgtos priežastys, dėl kurių bėgančiosios bangos elektroniniuose oscilografuose atsiranda tiriamųjų signalų iškraipymų ir prietaisų sparta būna ribota. Atlikta kreipiančiojo elektrinio lauko pasiskirstymo lėtinimo ir kreipimo sistemose analizė, atskleisti elektronų kreipimo ypatumai, aptartos netiesinių iškraipymų mažinimo ir fokusavimo kokybės gerinimo galimybės. Pasiūlyta skaičiavimo metodika ir ištirtos vamzdžio pereinamosios charakteristikos formos ir kilimo trukmės priklausomybės nuo zonduojančio įtampos šuolio, jo poliškumo, pradinės trajektorijos, pradinio poslinkio įtampos ir lėtinimo ir kreipimo sistemos tipo.

Trečiajame skyriuje nagrinėtos kvazisimetrinės konstrukcijos lėtinimo ir kreipimo sistemos savybės, atskleisti reiškiniai, lemiantys kvazisimetrinės spiralinės lėtinimo ir kreipimo sistemos savybes, sudarytas sistemos modelis, išnagrinėta užtrumpintų vijų įtaka sistemos lėtinimo koeficientui, įėjimo varžai ir slopinimui.

Ketvirtajame skyriuje nagrinėti įvairūs dvipradės spiralinės lėtinimo ir kreipimo sistemos variantai. Nagrinėtas elektrinis laukas dvipradėje spiralinėje sistemoje ir lygintas su elektriniu lauku

vienpradėje spiralinėje sistemoje. Pasiūlytas dvipradės lėtinimo ir kreipimo sistemos modelio patobulintas variantas. Atlikta patobulintos dvipradės lėtinimo ir kreipimo sistemos su vidiniu ekranu savybių analizė.

Penktajame skyriuje atskleista nevienalytiškumo įtaka lėtinimo ir kreipimo sistemų savybėms. Šiame skyriuje išsamiai nagrinėta plokščia spiralinė sistema, kurios spiralės juostelės plotis kinta – vija sudaryta iš dviejų skirtingo pločio atkarpų. Taip pat nagrinėta periodinių talpinio pobūdžio netolygumų, atsirandančių dėl dielektrinių laikiklių, įtaka plokščios spiralinės ir meandrinės sistemų savybėms. Atskleisti reiškiniai plačiajuosčių traktų ir lėtinimo ir kreipimo sistemų jungėse. Sudaryta bėgančiosios bangos elektroninio vamzdžio signalinio trakto ekvivalentinė schema, pasinaudojant daugkartinių atspindžių diagramomis, išvestos atspindžio koeficientų ir perdavimo funkcijų išraiškos, nagrinėtos charakteristikos, apibūdinančios signalinio trakto ir elektroninio vamzdžio savybes.

Šeštajame skyriuje sudaryti nevienalyčių lovelinių sistemų modeliai ir palygintos nevienalyčių ir vienalyčių spiralinių ir meandrinų sistemų charakteristikos. Pateikta vienalyčių ir nevienalyčių spiralinių lovelinių lėtinimo ir kreipimo sistemų analizė automatizuoto projektavimo programiniu paketu *CST Microwave Studio*.

1 skyrius**Literatūros apžvalga ir uždavinių formulavimas****1.1 Naujų lėtinimo ir kreipimo sistemų konstrukcijų apžvalga**

Oscilografiniuose bėgančiosios bangos elektroniniuose vamzdžiuose elektronų pluoštui kreipti taikomos spiralinės, meandrinės, lovelinės, nesimetrinės ir simetrinės lėtinimo ir kreipimo sistemos [1-8, 44, 46, 130-141]. Siekiant sukurti lėtinimo ir kreipimo sistemas ir elektroninius vamzdžius, skirtus spartesniems procesams tirti, atskleistos tiriamųjų signalų dažninių iškraipymų priežastys, sukurti vamzdžių dažninių ir pereinamųjų charakteristikų skaičiavimo algoritmai ir programos [1-8, 44, 45, 142, 143], daug dėmesio skirta tobulesnių lėtinimo ir kreipimo sistemų, leidžiančių sumažinti tiriamų signalų formos iškraipymus bėgančiosios bangos elektroniniuose vamzdžiuose, paieškai [4, 6-8, 23, 132, 135, 143].

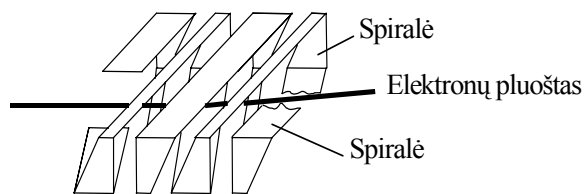
Publikacijose [55, 57-59, 158, 164-167] tyrinėti paprasčiausi elektrodinaminių lėtinimo ir kreipimo sistemų atvejai: apvalaus skerspjuvio spiralinės lėtinimo ir kreipimo sistemos ir paprasti meandrinės sistemų variantai. Monografijose [54, 56] apibendrinti to meto tyrimų rezultatai. Ten spiralinės ir meandrinės sistemos nagrinėtos kaip dispersinės ir nedispersinės vėlinimo linijos ir kaip lėtinimo ir kreipimo sistemos.

1965 metais elektrodinaminės vėlinimo ir lėtinimo ir kreipimo sistemos pradėtos sistemingai tirti Lietuvoje, Kauno politechnikos instituto Vilniaus filiale (dabar Vilniaus Gedimino technikos universitetas) prof. Z. Vainorio suburtoje mokslininkų grupėje. Z. Vainorio mokykla sistemingai tyrė elektrodinamines vėlinimo bei lėtinimo ir kreipimo sistemas, sukūrė tvirtą teorinį pagrindą ir daugeliu teorinių ir praktinių pasiekimų pirmavo pasaulyje. Buvo sukurta elektronų kreipimo bėgančiosios bangos elektroniniuose vamzdžiuose teorija: ištirta įvairių faktorių įtaka bėgančiosios bangos kreipimo sistemų ir bėgančiosios bangos elektroninių vamzdžių dažninėms ir pereinamosioms charakteristikoms, suformuluoti reikalavimai bėgančiosios bangos kreipimo sistemoms. Taip pat sukurta apibendrinta bėgančiosios bangos lėtinimo ir kreipimo sistemų teorija: sudaryti sudėtingų nehomogeninių lėtinimo ir kreipimo sistemų apibendrinti modeliai, ištirtos

įvairių sistemų savybės, atlikta plačiajuosčių kreipimo sistemų didelio jautrio bėgančiosios bangos elektroniniams vamzdžiams paieška, pasiūlyta naujų techninių sprendimų. Atlikti lėtinimo ir kreipimo sistemų ir bėgančiosios bangos oscilografinių elektroninių vamzdžių signalinių traktų projektavimo darbai bei sudaryti projektavimo pagrindai: sukurta lėtinimo ir kreipimo sistemų ir signalinių traktų kūrimo ideologija, sukurta projektavimo programinė įranga, pasiūlyta naujų didelio jautrumo ir plačios pralaidumo juostos lėtinimo ir kreipimo sistemų konstrukcijų (26 išradimai). Čia pirmiausiai buvo analizuotos spiralinės sistemos. Taikant elektrodinaminį metodą buvo sudaryti apvalaus ir stačiakampio skerspjūvio spiralinių sistemų apibendrinti modeliai, išvestos dispersinės lygtys, gautos banginės varžos, ilginės talpos ir ilginio induktyvumo išraiškos. Taip pat buvo išvestos spiralinių sistemų su juostine spirale ir elipsinių spiralinių sistemų dispersinės lygtys. Ištirtos spiralinių sistemų su pasukta vija savybės, įvertinta ekranų ir daugiasluoksnių dielektriko įtaka. Taikant daugialaidžių linijų metodą, tirtos nesimetrinės ir simetrinės spiralinės ir meandrinės lėtinimo ir kreipimo sistemos. Spiralinės sistemos nagrinėtos ir kaip plačiajuostės vėlinimo linijos, ir kaip lėtinimo ir kreipimo sistemos bėgančiosios bangos elektroniniams vamzdžiams. Rezultatai publikuoti įvairiuose leidiniuose, detaliau aprašyti mokslininkų disertacijose ir apibendrinti [44]. Sukurtos lėtinimo ir kreipimo sistemos ir signaliniai traktai įdiegti elektroniniuose vamzdžiuose 10ЛЮ102М, 10ЛЮ103М, ЭЛНН-1, 13ЛН13, 13ЛЮ107А, 16ЛЮ101А, ЛН-27. Sukurti elektroniniai vamzdžiai panaudoti oscilografuose С1-97, С1-97А, С1-104, С1-108, С1-116, С7-10В, С9-13, И9-13, С1-Х. Šioje mokykloje dirbančių profesorių R. Kirvaičio, R. Martavičiaus, J. Skudučio, J. Stankūno, S. Štaro, Z. Vainorio darbai įvertinti Lietuvos Mokslo premijomis. Šioje srityje taip pat dirbo ir prisidėjo prie vėlinimo bei lėtinimo ir kreipimo sistemų tobulinimo V. Daškevičius, A. Gurskas, A. Jurjevas, A. Kleiza, K. J. Maceika, V. Mališauskas, V. Urbanavičius ir kiti. Kita vertus, dar yra spręstinių klausimų tobulinant lėtinimo ir kreipimo sistemas, jų modelius ir analizės metodikas. Viena tokių klausimų grupė susijusi su netiesiniais iškraipymais lėtinimo ir kreipimo sistemose. Be to, tobulėjant lėtinimo ir kreipimo sistemų analizės metodams, atsiranda naujų galimybių, leidžiančių tiksliau įvertinti sistemų savybes įtakančius veiksnius. Šiai problemai spręsti dideles galimybes teikia šiuolaikiniai skaitmeniniai metodai bei šiuolaikinės skaičiavimo technikos galimybės.

Lygiagrečiai tyrinėjimams Vilniaus Gedimino technikos universitete lėtinimo ir kreipimo sistemų analizė bei tobulinimas buvo atliekami ir kitose pasaulio šalyse. Tačiau ne visos konstrukcijos buvo pakankamai išsamiai analizuotos. Todėl kyla uždavinys apžvelgti ir analizuoti naujus ir mažai nagrinėtus lėtinimo ir kreipimo sistemų variantus. Apžvelkime lėtinimo ir kreipimo sistemos variantus, kurie nebuvo pakankamai tirti.

[30, 129, 143, 144] konstatuojama, kad dažniuose virš 1 GHz bėgančiosios bangos elektroniniuose vamzdžiuose elektronų pluoštas dėl atsirandančio išilgai lėtinimo ir kreipimo

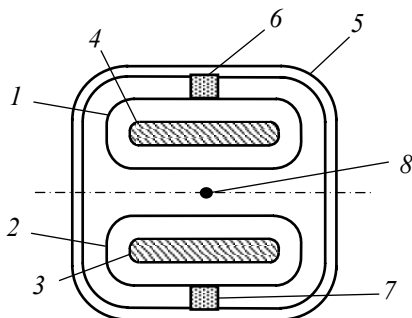


1.1 pav. Kreipimo sistemos su įtampos gradiento kompensavimu dviejų koncentrinių spiralių elektrodai

išilgai sistemos kaitaliojasi. Prie spiralės elektrodų jungiami vienodos amplitudės priešingo poliaringo signalai. Išilginiai įtampos gradientai išilgai plačiųjų segmentų yra kompensuojami visiškai lygiais, priešingais įtampos gradientais siauruosiuose segmentuose. Tokiu būdu eliminuojamas elektronų pluošto išfokasavimas dėl įtampos gradiento [143, 144]. Tokios konstrukcijos dvipradė lėtinimo ir kreipimo sistema ištirta prof. J. Skudučio [23, 143, 144] ir dr. V. Daškevičiaus [30] disertacijose automatizuoto projektavimo paketu *Microwave Office*. Tačiau naudojant automatizuoto projektavimo paketą *Microwave Office* skaičiavimai trunka labai ilgai, atskleidžiama tik bendra visų veiksmų įtaka lėtinimo ir kreipimo sistemų savybėms. Atskirų veiksmų, svarbių lėtinimo ir kreipimo sistemų savybėms atskleisti, analizė komplikuoja. Taip pat elektrinio lauko struktūra bėgančiosios bangos dvipradėje lėtinimo ir kreipimo sistemoje nepakankamai tirta, todėl aktualu nagrinėti elektrinį lauką dvipradėje spiralinėje sistemoje ir palyginti jį su elektriniu lauku kitose spiralinėse lėtinimo ir kreipimo sistemose.

Didžiausias įtampų matavimo tikslumas pasiekiamas taikant kompensacinius metodus [145, 146]. Trumpų elektrinių impulsų momentinių verčių kompensaciniams matavimams atlikti, buvo sukurti specialūs elektroniniai vamzdžiai [6, 49, 139] su plokštelių pavidalo ir bėgančiosios bangos lėtinimo ir kreipimo sistemomis. Momentinių įtampų verčių matuokliuose simetrinės bėgančiosios bangos lėtinimo ir kreipimo sistemos panaudojamos nesimetriniu režimu. Į vieną lėtinimo ir kreipimo elektrodą nukreipiamas tiriamasis signalas, į kitą – kompensacinė įtampa. Tačiau tada lėtinimo ir kreipimo sistemoje susižadina nelyginė ir lyginė elektromagnetinės bangos. Dėl pastarosios bangos gali atsirasti papildomų tiriamojo signalo iškraipymų [146]. Siekiant išvengti šių iškraipymų, buvo pasiūlyta nesimetrinė bėgančiosios bangos lėtinimo ir kreipimo sistema su papildomu kompensaciniu elektrodu [6, 139].

J. V. Čaiko [46] pasiūlė alternatyvų sprendimą – panaudoti kreipimo sistemą, sudarytą iš dviejų spiralinių elektrodų, ir jos vienos spiralės (skirtos kompensacinei įtampai) vijas trumpai sujungti metalo sluoksniu, sudarytu ant keraminio spiralės laikiklio (1.2 pav.). Sprendimas buvo pagrįstas tuo, kad, veikiant kompensacinei įtampai ir įtampai, sužadinančiai sistema sklindančią



1.2 pav. Kvazisimetrinės spiralinės sistemos pjūvio vaizdas:

1, 2 – spiralinių laidininkai, 3, 4 – vidiniai ekranai, 5 – išorinis ekranas, 6, 7 – spiralinių laikikliai; 8 – elektronų pluoštas

elektromagnetinę bangą, vamzdžio jautrumas būna toks pat. Nors tokia kvazisimetrinė sistema buvo įdiegta plačiajuosčiame bėgančiosios bangos elektroniniame vamzdyje, nėra duomenų apie jos išsamesnius tyrimus. Konstatuota tik tai, kad sistemoje pasiekiamas gana didelis slopinimas. Tokiu būdu, kyla uždavinys išsamiau išnagrinėti kvazisimetrinės konstrukcijos lėtinimo ir kreipimo sistemos savybes.

Nevienalyčių spiralinių sistemų savybės tirtos daugelyje darbų [4, 6, 143], tačiau juose daugiausia dėmesio skirta nevienalytiškumo įtakai sistemų savybėms žemųjų dažnių srityje. Sistemų

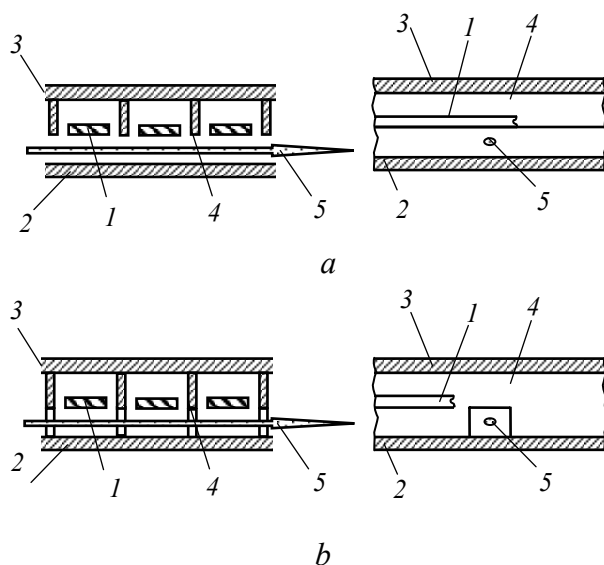
savybės žemųjų dažnių srityje akcentuotos neatsitiktinai: jeigu spiralinio laidininko skersiniai matmenys pastovūs, didėjant dažniui, konstrukcinio nevienalytiškumo įtaka dažniausiai mažėja, nes elektromagnetinis laukas įgyja paviršinį pobūdį – telkiasi prie lėtinimo elektrodo [44, 50].

Kita vertus, taip pat taikomos spiralinės sistemos, kurių spiralinių laidininkų matmenys kinta išilgai vijos. Bėgančiosios bangos lėtinimo ir kreipimo sistemose, praplatinus vijų dalis elektroninio pluošto kreipimo srityje, pavyksta pasiekti didesnę oscilografinio vamzdžio jautrumą.

Meandrinų vėlinimo bei lėtinimo ir kreipimo sistemų atvejais dėl meandro juostelės pločio skirtumo meandro periode dažninėse charakteristikose atsiranda trūkis [26, 28], rezonansas [31], kai fazių skirtumas θ tarp gretimų laidininkų lygus $\pi/2$. Tuomet meandrinė sistema įgyja juostinio užtvarinio filtro savybes [26, 28, 31]. [8] akcentuojami spiralinių lėtinimo ir kreipimo sistemų ir elektroninių vamzdžių charakteristikų netolygumai ties dažniais, kai gretimose vijose virpesių fazių skirtumas tampa artimas π . Todėl aktualu išsamiau ištirti nevienalytiškumo ir periodinių netolygumų įtaką kreipimo sistemų savybėms aukštutinių dažnių srityje (kai fazių skirtumas tampa artimas π).

Banginė varža ir lėtinimo koeficientas yra pastovūs plačiame dažnių ruože, kai naudojamos lovelinės spiralinės ir meandrinės sistemos [6, 147]. Jose tarp gretimų spiralės ar meandro laidininkų yra ekranuojančiosios sienelės (1.3 pav., a), susilpninančios elektromagnetinį ryšį tarp gretimų spiralės ar meandro laidininkų. Panaudojant ekranuojančiąsias sieneles, galima efektyviai pagerinti sistemų dažnines charakteristikas [148].

Atsižvelgiant į tai, kad lovelinių sistemų ekranuojančiosios sienelės leidžia sumažinti dispersiją ir banginės varžos priklausomybę nuo dažnio, [132, 135] buvo pasiūlytos spiralinių ir meandrinų bėgančiosios bangos lėtinimo ir kreipimo sistemų konstrukcijos, kuriose



1.3 pav. Superplaciajuosčių kreipimo sistemų pjūvių fragmentai:

1 – spiralės arba meandro formos laidininkas;
2, 3 – ekranai; 4 – ekranuojančioji sienelė; 5 – elektronų pluoštas

ekranuojančiųjų sienelių aukštis padidintas tiek, kad šios sienelės jungtų apatinį ir viršutinį ekranus (1.3 pav., *b*). Nurodytuose šaltiniuose teigiama, kad taip galima išvengti ryšio tarp vijų bei rezonansinių reiškinių galuose trumpai sujungtoje ilgosios linijos atkarpoje, sudarytoje iš spiralinės sistemos vidinio ir išorinio ekranų. Tačiau tokių lėtinimo ir kreipimo sistemų ekranuojančiose sienelėse turi būti angos elektroniniam pluoštui. Dėl šių angų atsiranda periodinių signalinio trakto netolygumų ir lovelinės sistemos tampa nevienalytės. Išsamesnės tokių sistemų analizės nebuvo aptikta, todėl svarbu ištirti nevienalyčių lovelinių lėtinimo ir kreipimo sistemų savybes.

Svarbūs lėtinimo ir kreipimo sistemų elementai yra lėtinimo elektrodų dielektriniai laikikliai ir jungės tarp traktų elementų.

Dielektrinių laikiklių įtaka lėtinimo ir kreipimo sistemų savybėms nagrinėta daugelyje darbų [24, 27, 100, 149–158]. Laikiklių įtakai įvertinti taikyti įvairūs modeliai bei metodai. Modeliuoti įvairūs dielektrinių laikiklių variantai [24], gautos normuoto fazinio greičio, įėjimo varžos dažninės priklausomybės [24, 151, 152], spiralinės lėtinimo ir kreipimo sistemos savybės analizuotos taikant specialią programinę įrangą *MAFIA* [24]. Darbe [151] atlikta spiralinės lėtinimo ir kreipimo sistemos elektrinio lauko analizė, nagrinėtos sistemos savybės, kai naudojami apvalaus, stačiakampio skerspjūvio ir T pavidalo laikikliai, parodyta, kad skaičiavimų rezultatai priklauso nuo įvertinamų erdvinų harmonikų skaičiaus.

Svarbu pastebėti, kad dažniausiai mikrobangų diapazono prietaisuose lėtinimo sistemos panaudojamos palyginti siaurame dažnių diapazone. Todėl galimybės išvengti nevienalyčių spiralinių ir meandrinų sistemų užtvarinės juostos žinomuose darbuose išnagrinėtos nepakankamai.

Vėlinimo įtaisams ir bėgančiosios bangos elektroniniams vamzdžiams reikalingos lėtinimo ir kreipimo sistemos, kurių praleidžiamųjų dažnių juosta tęsiasi nuo 0 iki keliolikos gigahercų. Todėl, siekiant atskleisti spiralinių ir meandrinų sistemų praleidžiamųjų dažnių juostos platinimo galimybes, reikia nagrinėti periodinių talpinio pobūdžio netolygumų, atsirandančių dėl dielektrinių laikiklių, įtaką spiralinių ir meandrinų sistemų savybėms. Atsižvelgiant į tai, kad dielektrinių laikiklių įtaka spiralinių ir meandrinų sistemų savybėms žemųjų dažnių srityje pakankamai

išsamiai išnagrinėta [6, 157, 158], daugiausia dėmesio verta skirti aukštųjų dažnių sričiai (ties $\theta \approx \pi / 2$ ir $\theta \approx \pi$).

Dėl dielektrinių laikiklių gali padidėti talpos tarp gretimų vijų bei vijų ir ekranų. Kaip žinoma, parazitinių talpų tarp vijų galima išvengti panaudojant šukų pavidalo laikiklius [136]. Todėl verta nagrinėti tik parazitinių talpų, kurios susidaro tarp lėtinimo elektrodų ir ekranų, įtaką.

Aukštadažnių traktų savybės ir praleidžiamųjų dažnių juosta taip pat labai priklauso nuo jungių tarp traktų elementų. Nors jungių ir jungčių tyrimo ir tobulinimo klausimai nagrinėti daugelyje darbų, jie aktualūs ir šiandien. Naujų galimybių jungių tyrimui teikia skaitmeninių metodų taikymas [103, 159].

Aukštadažnėse jungėse susidaro trakto netolygumai, vyksta elektromagnetinių bangų tipų transformacija, todėl tiriamos net palyginti paprastos jungės ir tobulinami jų modeliai. Daug sudėtingesnis tiek modeliavimo, tiek realizavimo požiūriu yra lėtinimo ir kreipimo sistemų ir aukštadažnių traktų sąsajos klausimas. Tiesa, daugeliu atveju svarbu, kad lėtinimo ir kreipimo sistema būtų gerai suderinta su aukštadažniu traktu tik tam tikrame dažnių ruože. Tačiau vėlinimo linijų ir lėtinimo ir kreipimo sistemų atvejais praleidžiamųjų dažnių juosta turi būti labai plati – nuo nulio iki keliolikos gigahercų.

Lėtinimo ir kreipimo sistemų galuose dėl elektrinio lauko sklaidos susidaro talpinio pobūdžio reaktyvumai. Siekiant šiuos reaktyvumus sumažinti, [6, 44, 50, 137, 138] pasiūlyta siaurinti kraštines spiralinių ir meandrinų lėtinimo ir kreipimo sistemų vijas arba didinti tarpus tarp šių vijų ir ekranų. Eksperimentiškai nustatyta [6], kad taip galima sumažinti atspindžius nuo lėtinimo ir kreipimo sistemų galų. Tokią spiralinės lėtinimo ir kreipimo sistemos ir plačiajuosčio trakto sąsajos galimybę patvirtino modeliavimas ir skaičiavimai [159], atlikti taikant programų paketą *Microwave Office*. Kita vertus, reikia pasakyti, kad nors skaitmeniniai metodai ir programų paketas *Microwave Office* teikia didelių galimybių, lieka sunkiai sprendžiamų klausimų – atskleidžiama daugelio veiksnių bendra įtaka tiriamosios sistemos savybėms. Atskirų veiksnių įtakos tyrimas komplikuoatas – sistemos varianto charakteristikų skaičiavimai trunka labai ilgai. Be to, [159] nagrinėtos dažninės charakteristikos, apibūdinančios signalų perdavimą į sistemos apkrovą. Nagrinėjant bėgančiosios bangos elektroninių vamzdžių dažnines savybes ir spartą, svarbesnės yra dažninės charakteristikos, apibūdinančios signalų perdavimą iš signalinio trakto įėjimo į išėjimą ir į elektroninio vamzdžio ekraną [6, 26]. [159] sprendžiamas reaktyvumų lėtinimo ir kreipimo sistemos galuose kompensavimo klausimas. Kadangi reaktyvumų įtaką įmanoma kompensuoti tik palyginti siaurame dažnių ruože, plačiajuosčių traktų atveju, geriau nagrinėti ne kaip kompensuoti reaktyvumus, o kaip jų išvengti.

Atsižvelgiant į tai, kas pasakyta, aktualu nagrinėti reiškinius plačiajuosčių traktų ir lėtinimo ir kreipimo sistemų jungėse, išsiaiškinti šių jungių ir bėgančiosios bangos elektroninių vamzdžių lėtinimo ir kreipimo sistemų tobulinimo galimybes.

Vystantis technologijoms tobulėja elektrinių signalų atvaizdavimo ir tyrimo prietaisai. Pastaraisiais metais ypač tobulėja skaitmeniniai oscilografai, jų charakteristikos kasmet gerėja: plečiasi darbinių dažnių diapazonas, mažėja atvaizdavimo klaidų kiekis, mažėja pereinamosios charakteristikos kilimo trukmė. Pradedant šį darbą, skaitmeninių oscilografų praleidžiamų dažnių diapazonas siekė 5 GHz. Šiuo metu tokie oscilografai gali tirti signalus net iki 15 GHz. Deja, šiuo metu tokie oscilografai yra labai brangūs. Tuo tarpu analoginė oscilografija turi savo vietą rinkoje ir šiandien dėl paprastesnio oscilografų valdymo ir mažesnės kainos. Tačiau tobulėjant skaitmeniniams oscilografams, analoginiuose oscilografuose naudojamų bėgančiosios bangos elektroninių vamzdžių ir lėtinimo ir kreipimo sistemų potencinių galimybių įvertinimo uždavinys tampa dar aktualesnis. Todėl aktualu atlikti bėgančiosios bangos elektroninių vamzdžių bei lėtinimo ir kreipimo sistemų potencinių galimybių analizę ir atskleisti lėtinimo ir kreipimo sistemų variantus, leidžiančius užtikrinti bėgančiosios bangos elektroninių vamzdžių plačią praleidžiamų dažnių juosta ir aukštą veikimo spartą.

1.2 Elektronų pluošto kreipimo lėtinimo ir kreipimo sistemose ir bėgančiosios bangos elektroniniuose vamzdžiuose analizė

Oscilografinių bėgančiosios bangos elektroninių vamzdžių ir jų signalinių traktų spartą ir dėl ribotos veikimo spartos kylančius dažninius iškraipymus apibūdina dinaminės charakteristikos.

Elektroninių vamzdžių signalinių traktų dinaminės charakteristikos skiriasi nuo vamzdžių charakteristikų. Šių charakteristikų sąryšiai išnagrinėti [160]. Nepaisant to, lėtinimo ir kreipimo sistemos dažninės charakteristikos kartais interpretuojamos kaip elektroninio vamzdžio charakteristikos [7, 8].

Literatūroje [4, 6, 39, 44, 141] gana išsamiai išnagrinėtos bėgančiosios bangos elektroninių vamzdžių dinaminės charakteristikų priklausomybės nuo slopinimo, dispersijos lėtinimo ir kreipimo sistemoje, elektronų lėkio trukmės ir kitų veiksnių. Suformuluoti reikalavimai [4, 6] lėtinimo ir kreipimo sistemų parametrams, kuriuos patenkinus galima gauti reikalaujamą vamzdžio ekvivalentinės pralaidumo juostos plotį ir pereinamosios charakteristikos kilimo trukmę. Tačiau, po to, kai buvo suformuluoti reikalavimai lėtinimo ir kreipimo sistemoms, žinios apie kai kurių veiksnių įtaką vamzdžių charakteristikoms pasipildė [15, 163]. Todėl, ieškant vamzdžių spartos didinimo galimybių, reikalavimus lėtinimo ir kreipimo sistemoms verta kritiškai peržiūrėti. Nors sukurti vamzdžių dažninių ir pereinamųjų charakteristikų skaičiavimo algoritmai ir programos, yra

klausimų, kurie dar mažai nagrinėti. Viena tokių klausimų grupė susijusi su netiesiniais iškraipymais bėgančiosios bangos lėtinimo ir kreipimo sistemose, netiesinių iškraipymų mažinimo galimybėmis ir būdais.

Didėjant dažniui, elektromagnetinio lauko stiprumas lėtinimo ir kreipimo sistemose kinta ir tampa priklausomas nuo skersinės koordinatės. Dėl šios priežasties, didėjant dažniui, didėja ne tik dažniniai, bet ir netiesiniai tiriamųjų signalų vaizdų iškraipymai. Be to, prastėja elektronų pluošto fokusavimo kokybė. Nors paminėti reiškiniai žinomi [7, 161], jie ištirti nepakankamai.

Skaičiuojant perdavimo funkcijas ir pereinamąsias charakteristikas [6, 44, 45] atsižvelgiama į elektrinio lauko pasiskirstymą bėgančiosios bangos lėtinimo ir kreipimo sistemoje, tačiau neatsižvelgiama į kreipiančiojo elektrinio lauko stiprumo kitimą kintant kreipiamojo elektrono skersinei koordinatei lėtinimo ir kreipimo sistemoje. Taigi [6, 44, 45] taikytas silpno tiriamojo signalo modelis.

Iš tikrųjų kreipiamojo elektrono poslinkis bėgančiosios bangos lėtinimo ir kreipimo sistemoje gali būti gana didelis, artimas nuotoliui tarp lėtinimo ir kreipimo sistemos elektrodų. Į tai bandyta atsižvelgti [162]. Tačiau klausimas išnagrinėtas nepakankamai: neatsižvelgta į tai, kad pradinė elektrono trajektorija gali nesutapti su tarpo tarp kreipimo elektrodų viduriu ir priklauso nuo poslinkio įtampos, nenagrinėti elektronų kreipimo simetrinėse lėtinimo ir kreipimo sistemose ypatumai.

Atsižvelgiant į tai, kas paminėta, aktualu nagrinėti bėgančiosios bangos elektroninio vamzdžio pereinamosios charakteristikos skaičiavimo galimybes, kai tiriamasis signalas stiprus. Tam būtina nagrinėti vamzdžio pereinamosios charakteristikos formos ir kilimo trukmės priklausomybes nuo zonduojančio įtampos šuolio, jo poliškumo, pradinės trajektorijos, pradinio poslinkio įtampos ir lėtinimo ir kreipimo sistemos tipo.

1.3 Elektrodinaminių lėtinimo ir kreipimo sistemų analizės metodai

Svarbiausi projektavimo etapai yra projektinių sprendinių sintezė ir gautų rezultatų analizė. Tam tikslui būtina turėti projektuojamo įtaiso matematinį modelį. Todėl spiralinei lėtinimo ir kreipimo sistemai tenka spręsti Maksvelo lygtis, įvertinant konkrečias ribines sąlygas. Net paprasčiausių sistemų atveju tikslus matematinis šių lygčių sprendimas neįmanomas, nes nėra tokios koordinačių sistemos, kurioje atsiskirtų kintamieji Maksvelo lygtyse. Todėl naudojami apytikriai analitiniai metodai, geriau ar prasčiau įvertinantys realius fizinius procesus nagrinėjamose sistemose: elektrodinaminis, ekvivalentinių schemų ir daugialaidžių linijų metodai [6, 23, 26, 29, 44].

Spiralinių sistemų analizei dažniausiai buvo taikomas elektrodinaminis metodas. Šiuo atveju apvalaus skerspjūvio spiralės modelį sudarė anizotropiškai ir izotropiškai laidūs cilindrai, išdėstyti spiralės ašies kryptimi ir modeliuojantys tiek spiralinį laidininką, tiek vidinį ir išorinį ekranus. Ištesto stačiakampio skerspjūvio spiralinės lėtinimo ir kreipimo sistemos modelį sudarė anizotropiškai laidžios plokštumos, modeliuojančios spiralinį laidininką, ir izotropiškai laidžios plokštumos, modeliuojančios ekranus [168, 169]. Taikant elektrodinaminį metodą gaunamas nagrinėjamos sistemos elektromagnetinio lauko dedamųjų pasiskirstymas sistemos skerspjūvio plokštumoje, sistemos ilginiai parametrai, banginės varžos išraiškos ir dispersinės lygtys. Šis metodas leidžia tik apytiksliai įvertinti laidininko konfigūracijos ir matmenų įtaką tiek spiralinių, tiek meandrinų sistemų savybėms.

Pastaruoju metu tiek spiralinių, tiek meandrinų sistemų analizei dažniau taikomas daugialaidžių linijų metodas [26]. Daugialaidžių linijų metodas ypač plačiai taikytas ištesto stačiakampio spiralinių lėtinimo ir kreipimo sistemų analizei [6, 44]. Lėtinimo ir kreipimo sistemos modeliuojamos daugialaide linija, kurios lygiagrečios laidininkų atkarpos yra statmenos modeliuojamos sistemos ašiai, o skerspjūvio matmenys ir konstrukcija sutampa su nagrinėjama sistema. Daugialaidės linijos laidininkų galai sujungiami taip, kad būtų modeliuojama meandrinė ar spiralinė lėtinimo ir kreipimo sistema. Daugialaidžių linijų metodas leidžia įvertinti laidininko konfigūraciją ir matmenis. Skaičiuojant sistemos lėtinimo koeficientą ir banginę varžą, reikia rasti modeliuojančios daugialaidės linijos banginius laidumus ar bangines varžas. Jiems skaičiuoti buvo taikomi dalinių talpų [170], konforminių pakeitimų [165] banginių laidumų skaičiavimo metodai. Daugialaidžių linijų metodu buvo ištirta daugybė spiralinių ir meandrinų lėtinimo ir kreipimo sistemų [26, 50, 54, 171-173].

Pastaruoju metu elektrodinaminių sistemų analizei vis plačiau taikomi skaitmeniniai metodai [14, 61-94]. Pirmiausia elektrinių ir magnetinių laukų analizei buvo pradėtas taikyti baigtinių skirtumų metodas [94]. Metodas paremtas skaičiuojamosios srities dalinimu tinkleliu, skaičiavimus atliekant tinklelio mazguose. Taikant šį metodą, pavyko rasti tikslų elektrinio lauko pasiskirstymą mikrojuostelinio filtro skerspjūvyje [70]. [69] įvertintas baigtinių skirtumų metodo tikslumas ir pateikti skaičiavimo algoritmai, leidžiantys padidinti šio metodo tikslumą. Čia, labai svarbu teisingai parinkti koordinačių sistemą. Tikslumas priklauso nuo elementų skaičiaus, bei tinklelio. Kad metodas dažnai taikomas skaičiavimuose, liudija didelis paskelbtų monografijų [41, 65, 78, 81] ir straipsnių [69, 70, 72, 76, 79, 80, 82, 83, 85, 86, 92, 94] skaičius. Iki 2006 metų vidurio *IEEE* portale jau paskelbta daugiau nei 1700 straipsnių taikant baigtinių skirtumų metodą. [66, 175] šis metodas buvo taikytas banginių laidumų skaičiavimui.

Daugelis uždavinių, susijusių su elektromagnetinio lauko analize, yra sprendžiami baigtinių skirtumų laiko srityje metodu. Labai išsamiai šį metodą analizavo [86] darbo autorius. [83, 85, 86]

darbuose baigtinių skirtumų laiko srities metodas naudojamas dispersinių charakteristikų analizei. Iki 2006 vidurio *IEEE* portale jau paskelbta daugiau nei 7400 straipsnių. Šis metodas leidžia nagrinėti procesų dinamiką. Metodas remiasi Kane Yee pasiūlytu dabar vadinamu Yee algoritmu. *XFDTD* programinis paketas yra vienas naujausių, kuris elektromagnetinius uždavinius sprendžia baigtinių skirtumų laiko srityje metodu [120].

Kartais elektrodinaminių sistemų analizei taikomas integralinių lygčių metodas [75, 84]. Čia sprendiniai pateikiami integralinėmis lygtimis, kuriose nežinomieji įeina į pointegralines išraiškas. Nežinomiems srovių tankiams nustatyti integralinės lygtys dažniausiai sprendžiamos momentų metodu [74, 89, 91, 93, 174]. Todėl dažnai integralinių lygčių metodas vadinamas momentų metodu [73]. Šis metodas taip pat paplitęs elektrodinamikoje. Tai rodo šio metodo platus taikymas naujų programinių paketų, mikrobangų įtaisams tirti, realizavimui. Tai, kad momentų metodas gana plačiai taikomas, liudija nemažas publikacijų skaičius, iki 2006 vidurio *IEEE* portale straipsnių yra daugiau nei 6500.

Taip pat labai dažnai naudojamas ir skaitmeninis baigtinių elementų metodas. Iki 2006 vidurio *IEEE* portale galima aptikti daugiau nei 5500 straipsnių, kur taikomas baigtinių elementų metodas. Metodas paremtas skaičiuojamosios srities sudaliniu elementais, kuriuose lauką apibūdinančio diferencialinio dydžio kitimo dėsnis keičiamas dažniausiai nesudėtinga interpoliacine funkcija [71, 175]. Taikant kvazi-TEM priartėjimą baigtinių elementų metodu analizuojamos įvairių konstrukcijų elektrodinaminės sistemos ir skaičiuojamos planarinės sistemos banginė varža ir ilginė talpa [87]. Taikant baigtinių elementų metodą, labai svarbi skaičiuojamosios srities sudalinimo elementais procedūra. Ją automatizuoti sunku, todėl uždavinio sprendimo sėkmę lemia skaičiuotojo patirtis ir inžinerinė intuicija. [61] pataria, kaip galima realizuoti baigtinių elementų metodą naudojantis programiniu paketu *Matlab*, o [64] – naudojant programinę įrangą *Maple*. [62] analizuojami Maksvelo lygčių sprendimo būdai naudojant baigtinių elementų metodą, labiau gilinamasi į klaidų mažinimo galimybes. [63] analizuoja elektromagnetinį lauką baigtinių elementų metodu tiek vienmatėje, tiek dvimatėje, tiek trimatėje erdvėje, bei pateikia susidariusių problemų sprendimo būdus. Lyginant baigtinių skirtumų ir baigtinių elementų metodus, teigiama, kad antrasis yra universalesnis, nors, priešingai negu baigtinių skirtumų metodas, reikalauja didesnių kompiuterinių resursų, reikia daugiau darbo paruošiant pradinis duomenis ir programas [66]. Vystantis šiuolaikinėms technologijoms, kompiuterių sparta yra pakankamai didelė, be to jau yra sukurta programinių paketų, palengvinančių pradinis duomenų paruošimą, todėl baigtinių elementų metodą verta naudoti elektrodinaminių sistemų analizei. Tam labai gerai tinka *Matlab PDE Tools* programinis paketas. Šis programinis paketas supaprastina ir palengvina banginių laidumų skaičiavimą.

Skaitmeniniams metodams realizuoti sukurta daug programinių paketų: *Ansys*, *Argus*, *CST Microwave Studio*, *Femlab*, *EGN2*, *Fidelity*, *HFSS*, *IE3D*, *Linpar*, *MAFIA*, *Microwave Office*, *Multlin*, *Semcad*, *Translin*, *XFDTD* ir t.t. Juos galima suskirstyti į keturias grupes:

- a) laisvai prieinami, tačiau mokami programiniai paketai;
- b) nemokami programiniai paketai, tačiau su ribotomis galimybėmis;
- c) specialūs programiniai paketai su kodais, skirtais specializuotoms įmonėms;
- d) programiniai paketai, skirti greitam, tačiau apytiksliam vienokių ar kitokių elektrodinaminių sistemų parametrų nustatymui.

Egzistuojantys galingi elektrodinaminių sistemų modeliavimo programų paketai, kodai [12, 14, 24, 61, 64, 95-128] leidžia panaudoti skaitmeninius metodus ir spiralinių bei meandrinų sistemų modeliavimui. Nors konkrečiais atvejais skaičiavimai gali trukti labai ilgai [66], skaitmeniniai metodai leidžia įvertinti daugiau faktorių nei analitinių metodų modeliai ir duoda pakankamai tikslius rezultatus. Galima kurti didelio tikslumo įtaisų modelius, įvertinančius paviršinį ir kraštų efektus laidininkuose, nuostolius dielektrikuose ir elektrodų laikikliuose.

[101, 110, 143] spiralinės vėlinimo linijos modeliavimui buvo panaudota firmos „*Applied Wave Research*“ superaukštųjų dažnių įtaisų projektavimo programų paketas *Microwave Office* [121], kuris leido įvertinti daug veiksnių (sudėtingą laidininko formą, dielektriką atskirose sistemos vietose, kraštų efektus, nuostolius laidininke ir dielektrike), buvo apskaičiuotos sistemos dažninės amplitudės ir fazės charakteristikos, analizuotos rezonansų atsiradimo priežastys. [102, 115] elektroninis vamzdis su spiraline sistema buvo analizuotas *MAFIA* programų paketu. Čia skaičiuotos slopinimo koeficiento, fazės, įėjimo varžos dažninės priklausomybės. [95] spiralinės lėtinimo ir kreipimo sistemos analizei taikyti *HFSS*, *CST Microwave Studio* programiniai paketai, atlikta elektrinio lauko, perdavimo, lėtinimo koeficientų analizė, atliktas rezultatų, gautų abiem programų paketais palyginimas, atlikta kompiuterio resursų naudojimo analizė. Analizuojant spiralinę lėtinimo ir kreipimo sistemą kompiuterio resursų naudojimo įvertinimas atliktas ir [98] lyginant trimačio projektavimo *HFSS* ir *CST Microwave Studio* programinius paketus. [14] atlikta bangolaidžio fazės iškraipymų, įėjimo varžos analizė *MAFIA*, *HFSS*, *CST Microwave Studio* programiniais paketais, pateiktas skaičiavimo rezultatų palyginimas, skaičiavimams taip pat naudotas kodas *Christine*. Bendrai, trimačio projektavimo programiniai paketai leidžia papildomai įvertinti plokščios spiralės laidininkų šoninių dalių, išorinį ir vidinį spiralės ekranus jungiančius trumpiklius, dielektrinius spiralių laikiklius ir kitus elementus.

[99, 119] teigiama, kad programų paketas *CST Microwave Studio* yra pati šiuolaikiškiausia trimačio elektromagnetinio modeliavimo sistema. Puikus vartotojo interfeisas, galingi geometrinių modelių braižymo įrankiai ir ypač našus skaičiavimo branduolys leidžia gerokai

sutrumpinti projektavimo trukmę [99]. Čia taikomas integralinių lygčių metodas. *CST Microwave Studio* pakete bet kokios formos tūrinių struktūrų modeliavimui pagerinti yra sukurtas originalus aproksimacijos būdas idealioms ribinėms sąlygoms (*Perfect Boundary Approximation, PBA*) [99]. PBA metodas leidžia modeliuoti bet kokios formos kreivinius paviršius, išvengti laiptuoto priartėjimo paklaidos, nereikalaudamas smulkiausio skaidymo tinklelio, įvertinti metalinių sluoksnių arba mikrojuostelinių linijų storį papildomai nesuskaidytoje tinklelio skiltyje. Šio būdo galimybes išplėtė plonų sienelių metodas (*Thin Sheet Technique, TST*), leidžiantis optimaliai pateikti dvi kubinės tinklelio ląstelės dalis, atskirtas plona metaline sienele [99]. Paskutinėje, 5-oje *CST Microwave Studio* programų paketo versijoje panaudota dar viena skaidymo technologija – potinklių metodas (*Multilevel Subgridding Scheme, MSS*). Jis leidžia skaidymo linijoms prasidėti ir baigtis bet kuriame analizuojamo tūrio taške [99].

Automatizuotų projektavimo paketais sukurtų modelių analizei nereikalingos matematinės išraiškos. Nors, kaip minėta, atskleidžiama tik daugelio veiksnių bendra įtaka tiriamosios sistemos savybėms. Atskirų veiksnių įtakos tyrimas komplikluotas – sistemos varianto charakteristikų skaičiavimai trunka labai ilgai. Todėl disertacijoje lėtinimo ir kreipimo sistemų analizei panaudota daugialaidžių linijų metodo ir skaitmeninių metodų sinergija.

1.4 Darbo tikslas ir sprendžiami uždaviniai

Šio darbo tikslas: tirti nepakankamai nagrinėtų elektrodinaminių superplaciajuosčių lėtinimo ir kreipimo sistemų variantus, sudaryti jų modelius, tobulinti analizės metodus, analizuoti savybes, atskleisti bėgančiosios bangos elektroninių vamzdžių bei lėtinimo ir kreipimo sistemų potencines galimybes.

Tikslui pasiekti, būtina išspręsti šiuos uždavinius:

1. Tobulinti netiesinių iškraipymų įvertinimo bėgančiosios bangos elektroniniuose vamzdžiuose metodiką ir atskleisti netiesinių iškraipymų mažinimo galimybes.
2. Sudaryti mažai nagrinėtų lėtinimo ir kreipimo sistemų variantų modelius ir ištirti lėtinimo ir kreipimo sistemų savybes.
3. Atskleisti periodinių netolygumų įtaką lėtinimo ir kreipimo sistemų savybėms, modeliuoti ir analizuoti jungių įtaką lėtinimo ir kreipimo sistemų ir bėgančiosios bangos elektroninių vamzdžių savybėms.
4. Atlikti bėgančiosios bangos elektroninių vamzdžių bei lėtinimo ir kreipimo sistemų potencinių galimybių analizę, parenkant lėtinimo ir kreipimo sistemų variantus, leidžiančius užtikrinti

bėgančiosios bangos elektroninių vamzdžių plačią praleidžiamų dažnių juosta ir aukštą veikimo spartą.

2 skyrius

Bėgančiosios bangos elektroninių vamzdžių ir jų signalinių traktų dinaminių charakteristikų tobulinimo galimybių analizė

Šiame skyriuje, ieškodami vamzdžių spartos didinimo galimybių, peržiūrėsime reikalavimus lėtinimo ir kreipimo sistemoms. Siekdami apibendrinti pastarųjų metų tyrimo rezultatus ir atskleisti oscilografinių bėgančiosios bangos elektroninių vamzdžių ir jų signalinių traktų spartos didinimo galimybes, apžvelgsime priežastis, kurios apriboja prietaisų spartą ir dėl kurių bėgančiosios bangos elektroniniuose oscilografuose atsiranda tiriamųjų signalų iškraipymų.

Šiame skyriuje atliksime išsamesnę kreipiančiojo elektrinio lauko pasiskirstymo lėtinimo ir kreipimo sistemose analizę, atskleisime elektronų kreipimo ypatumus, aptarsime netiesinių iškraipymų mažinimo ir fokusavimo kokybės gerinimo galimybes. Taip pat aptarsime bėgančiosios bangos elektroninio vamzdžio pereinamosios charakteristikos skaičiavimo galimybes, kai tiriamasis signalas stiprus. Pasiūlysime skaičiavimo metodiką ir jos pagalba išanalizuosime vamzdžio pereinamosios charakteristikos formos ir kilimo trukmės priklausomybes nuo zondojuančio įtampos šuolio, jo poliškumo, pradinės trajektorijos, pradinio poslinkio įtampos ir lėtinimo ir kreipimo sistemos tipo.

Šio skyriaus svarbiausi rezultatai paskelbti [188, 194, 197].

2.1 Bėgančiosios bangos elektroninių vamzdžių ir jų signalinių traktų dinaminių charakteristikų tobulinimo galimybės

Oscilografinių bėgančiosios bangos elektroninių vamzdžių ir jų signalinių traktų spartą ir dėl ribotos veikimo spartos kylančius dažninius iškraipymus apibūdina dinaminės charakteristikos.

Vamzdžio dinaminės charakteristikos atspindi tiriamojo signalo vaizdo dažninius iškraipymus. Vamzdžio perdavimo funkcija išreiškiama formule $\underline{K}(j\omega) = \underline{S}_d(j\omega) / S_0$; čia $\underline{S}_d(j\omega)$

– vamzdžio dinaminis jautrumas, S_0 – statinis jautrumas. Skaičiuojant statinį ir dinaminį jautrumą, vertinama bėgančiosios bangos ir elektronų sąveika lėtinimo ir kreipimo sistemoje.

Vamzdžio signalinio trakto, kurio svarbiausias elementas – bėgančiosios bangos lėtinimo ir kreipimo sistema, perdavimo funkcija apibūdina įtampos trakto apkrovoje dažninius iškraipymus, palyginti su įtampa bangos, krintančios į trakto įėjimą. Siekiami apibendrinti pastarųjų metų tyrimo rezultatus ir atskleisti oscilografinių bėgančiosios bangos elektroninių vamzdžių ir jų signalinių traktų spartos didinimo rezervus, apžvelkime priežastis, dėl kurių bėgančiosios bangos elektroniniuose oscilografuose atsiranda tiriamųjų signalų iškraipymų ir prietaisų sparta būna ribota.

Daugiausia dėmesio skirsime vamzdžių su spiralinėmis lėtinimo ir kreipimo sistemomis dinaminėms charakteristikoms ir jų tobulinimo galimybėms.

2.1.1 Dispersijos įtaka

Vienas iš svarbiausių veiksnių, lemiančių bėgančiosios bangos elektroninio vamzdžio praleidžiamųjų dažnių juostą, yra vėlinimo dispersija, kuri apibūdinama lėtinimo ir kreipimo sistemos vėlinimo trukmės dažnine charakteristika $t_v(f)$.

Lėtinimo ir kreipimo sistemos perdavimo funkcija išreiškiama formule

$$\underline{K}_{KS1}(j\omega) = e^{-j\omega t_v(f)}. \quad (2.1)$$

Taigi signalų formos iškraipymus lemia dažniniai faziniai iškraipymai.

Lėtinimo ir kreipimo sistemos pradžioje elektronų pluoštą veikia dar neiškraipytas (dėl dispersijos) signalas. Todėl signalų formos dažniniai faziniai iškraipymai vamzdžio ekrane yra mažesni nei lėtinimo ir kreipimo sistemoje, tačiau dėl elektromagnetinės bangos ir elektronų greičių nesuderinimo gaunami dažniniai amplitudiniai iškraipymai. Bėgančiosios bangos elektroninio vamzdžio perdavimo funkcija išreiškiama formule [6, 39, 44, 141]

$$\underline{K}_{EV1} = \frac{\sin y}{y} e^{-jy}; \quad (2.2)$$

čia

$$y = \omega(t_v - t_s)/2, \quad (2.3)$$

t_s – elektrono lėkio trukmė lėtinimo ir kreipimo sistemoje.

Sakykime, kad vėlinimo trukmė lėtinimo ir kreipimo sistemoje tiesiškai kinta didėjant dažniui f :

$$t_v = t_0 + S f; \quad (2.4)$$

čia t_0 – fazės vėlinimo trukmė žemųjų dažnių srityje, S –proporcingumo koeficientas, apibūdinantis charakteristikos $t_v(f)$ statumą.

Įrodyta [6, 44], kad vėlinimo trukmės pokytis vamzdžio ekvivalentinėje praleidžiamųjų dažnių juostoje turi būti ne didesnis kaip $0,35t_r^*$; čia t_r^* – reikalaujama pereinamosios charakteristikos kilimo trukmė ($t_r^* \cong 0,35/\Delta F_e^*$; čia ΔF_e^* – ekvivalentinės praleidžiamųjų dažnių juostos plotis).

2.1 paveiksle atvaizduotos lėtinimo ir kreipimo sistemos (1-oji kreivė) ir elektroninio vamzdžio (2-oji kreivė) pereinamosios charakteristikos, apskaičiuotos remiantis (2.1) ir (2.2) lygtimis. Skaičiuojant vamzdžio charakteristikas parinktas optimalus elektronų greitis, leidžiantis pasiekti mažiausią pereinamosios charakteristikos kilimo trukmę. 3-ioji grafiko kreivė vaizduoja vamzdžio pereinamąją charakteristiką, kuri būtų gauta, jei nebūtų dažninių amplitudinių iškraipymų.

Remiantis 2.1 paveikslu ir kitais skaičiavimų rezultatai, kai atsižvelgiama tik į fazės vėlinimo dispersiją, elektroninio vamzdžio pereinamosios charakteristikos kilimo trukmė išreiškiama formule

$$t_{\text{REV1}} \cong 0,78\sqrt{S}. \quad (2.5)$$

Signaliniame trakte dažniniai faziniai iškraipymai didesni. Jo pereinamosios charakteristikos kilimo trukmė apytikriai $\sqrt{2}$ karto ilgesnė:

$$t_{\text{rKS1}} \cong 1,12\sqrt{S}. \quad (2.6)$$

Remiantis reikalavimais lėtinimo ir kreipimo sistemoms [4, 6] elektroninio vamzdžio praleidžiamųjų dažnių juostoje ΔF_e^* vėlinimo dispersija turi būti ne didesnė kaip $0,35t_r^*$. Remiantis šia sąlyga,

$$t_r^* \cong \sqrt{S}. \quad (2.7)$$

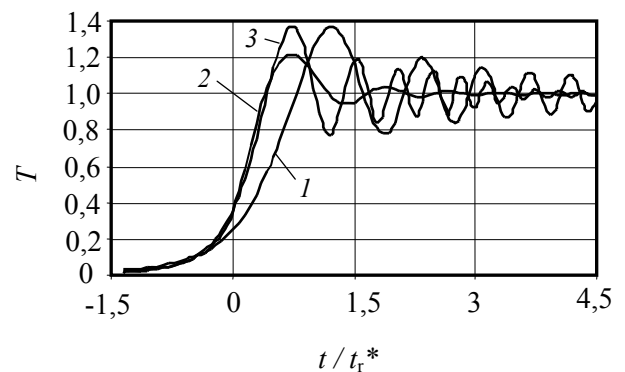
Lygindami 2.1 paveikslo kreives ir remdamiesi (2.5)–(2.7) sąryšiais, gauname, kad elektroninio vamzdžio pereinamosios charakteristikos kilimo trukmė t_{REV1} apytikriai lygi $0,78t_r^*$.

Signalinio trakto pereinamosios charakteristikos

kilimo trukmė t_{rKS1} apytikriai $\sqrt{2}$ karto ilgesnė:

$$t_{\text{rKS1}} \cong 1,12t_r^*.$$

Lygindami 2-ąją ir 3-iąją 2.1 paveikslo charakteristikas, matome, kad elektroninio vamzdžio dažninės amplitudės charakteristikos netolygumas beveik neturi įtakos vamzdžio pereinamosios charakteristikos kilimo trukmei, jeigu parinktas optimalus elektronų greitis. Nėgana to, dažninės amplitudės charakteristikos



2.1 pav. Signalinio trakto (1 kreivė) ir elektroninio vamzdžio (2, 3 kreivės) pereinamosios charakteristikos

lygio kritimas aukštųjų dažnių srityje gali net slopinti neigiamą dispersijos įtaką – kai nuslopintos spektro aukštadažnės dedamosios, sumažėja pereinamosios charakteristikos virpesiai ir plokščiosios dalies netolygumas.

2.1.2 Slopinimo įtaka

Atsižvelgiant į slopinimą, lėtinimo ir kreipimo sistemos, kaip keturpolio, perdavimo funkcija, kaip žinome, išreiškiama formule

$$K_{KS2}(j\omega) = e^{-\alpha L_S}; \quad (2.8)$$

čia α – slopinimo koeficientas; L_S – lėtinimo ir kreipimo sistemos ilgis.

Tarę, kad slopinimo koeficientas tiesiškai priklauso nuo dažnio, galime įsitikinti, kad perdavimo funkciją (2.8) atitinka pereinamoji charakteristika, išreiškiama formule

$$T_{KS2}(t) = \arctg \frac{t}{\tau_s}; \quad (2.9)$$

čia $\tau_s = k_\alpha L_S$, kur k_α – proporcingumo koeficientas, apibūdinantis slopinimo priklausomybę nuo dažnio ($\alpha = k_\alpha \omega$).

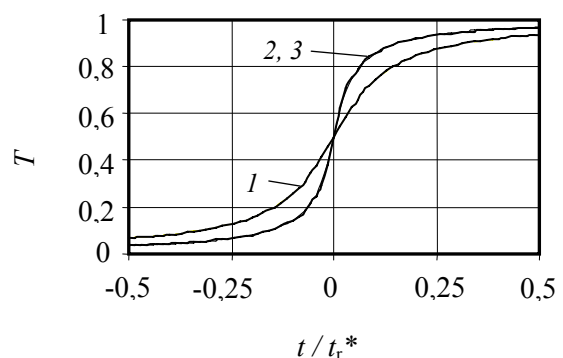
Elektroninio vamzdžio perdavimo funkcijos ir pereinamosios charakteristikos išraiškas galime rasti sprendami diferencialinę lygtį [6, 44], aprašančią elektrono judėjimą elektriniame lauke. Kai elektrono poslinkis lėtinimo ir kreipimo sistemoje daug mažesnis nei poslinkis ekrane (kai poslinkį ekrane lemia lėtinimo ir kreipimo sistemoje įgytas elektrono skersinis greitis), perdavimo funkcija išreiškiama formule

$$K_{EV2}(j\omega) = \frac{1 - e^{-\alpha L_S}}{\alpha L_S}. \quad (2.10)$$

Tuomet dažnių diapazone, kuriame slopinimas mažas ($\alpha L_S \ll 1$), perdavimo funkcijos išraišką (2.10) galime supaprastinti:

$$K_{EV2}(j\omega) \cong 1 - \frac{\alpha L_S}{2}. \quad (2.11)$$

2.2 paveikslas vaizduoja slopinimo įtaką lėtinimo ir kreipimo sistemos (1-oji kreivė) ir elektroninio vamzdžio (2-oji kreivė) pereinamosioms charakteristikoms. Skaičiuojant atsižvelgta į reikalavimus lėtinimo ir kreipimo sistemai – laikoma, kad elektroninio vamzdžio



2.2 pav. Įvertinant slopinimą apskaičiuotos kreipimo sistemos ir elektroninio vamzdžio pereinamosios charakteristikos

praleidžiamųjų dažnių juostoje slopinimas lėtinimo ir kreipimo sistemoje yra iki 2 dB. Tada $\tau_s \cong 0,0367 / \Delta F_e^*$.

Remiantis skaičiavimų rezultatais ir 2.2 paveikslu, lėtinimo ir kreipimo sistemos pereinamosios charakteristikos kilimo trukmė

$$t_{\text{rKS2}} \cong 6,2 \tau_s \cong 0,23 / \Delta F_{\text{ekv}} \cong 0,65 t_r^*. \quad (2.12)$$

Elektroninio vamzdžio pereinamosios charakteristikos kilimo trukmė

$$t_{\text{rEV2}} \cong 3,1 \tau_s \cong 0,114 / \Delta F_e^* \cong 0,32 t_r^*. \quad (2.13)$$

Taigi elektroninio vamzdžio pereinamosios charakteristikos kilimo trukmė aptartomis sąlygomis dvigubai trumpesnė nei lėtinimo ir kreipimo sistemos pereinamosios charakteristikos kilimo trukmė.

Perdavimo funkcijos išraišką (2.10) galima pakeisti eilute:

$$K(j\omega) = e^{-a} \frac{\text{sh } a}{a} \cong e^{-a} (1 + \frac{a^2}{6} + \dots); \quad (2.14)$$

$$\text{čia } a = \frac{\alpha l}{2}.$$

Kai slopinimas tiesiniu dėsniu priklauso nuo dažnio, imdami du pirmuosius eilutės narius, galime gauti tokią vamzdžio pereinamosios charakteristikos išraišką:

$$T_{\text{EV2}}(t) = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \left[\arctg \frac{t}{\tau_\alpha} + \frac{1}{3} \frac{t / \tau_\alpha}{(1 + (t / \tau_\alpha)^2)^2} + \dots \right]; \quad (2.15)$$

$$\text{čia } \tau_\alpha = \tau_s / 2.$$

Remiantis šia formule apskaičiuota elektroninio vamzdžio pereinamoji charakteristika (3 kreivė) sutampa su 2 kreive (2.2 pav.). Taigi, nagrinėjant slopinimo įtaką elektroninio vamzdžio dinaminėms charakteristikoms, (2.15) išraišką galima taikyti kaip elektroninio vamzdžio pereinamosios charakteristikos aproksimaciją.

2.1.3 Banginės varžos kitimo įtaka

Didėjant dažniui, didėja fazių skirtumas θ tarp spiralinės ar meandrinės sistemos gretimų laidininkų. Dėl ilginės talpos kitimo kinta sistemos banginė varža. Modeliuojant vienalytę spiralinę sistemą daugialaide linija, gaunama [6, 50], kad spiralinės sistemos banginė varža tokia pat kaip daugialaidės linijos banginė varža ir išreiškiama formule

$$Z_{\text{BS}}(\theta) = 1 / Y(\theta); \quad (2.16)$$

čia

$$Y(\theta) = Y(0) + (Y(\pi) - Y(0)) \sin^2(\theta/2); \quad (2.17)$$

θ – daugialaidės linijos gretimų laidininkų (gretimų spiralės vijų) įtampų ar srovių fazių skirtumas.

Nagrinėkime oscilografo signalinį traktą (2.3 pav., *a*), į kurį įjungtas elektroninis vamzdis su spiraline lėtinimo ir kreipimo sistema. Tada elektroninio vamzdžio perdavimo funkciją galėsime rasti, nagrinėdami įtampos perdavimą į lėtinimo ir kreipimo sistemos pradžią, o signalinio trakto perdavimo funkciją – įtampos perdavimą į apkrovos varžą. Tada, remdamiesi daugkartinių atspindžių diagrama (2.3 pav., *b*), galime gauti tokias elektroninio vamzdžio ir lėtinimo ir kreipimo sistemos perdavimo funkcijų išraiškas:

$$\underline{K}_{EV\Sigma}(j\omega) = \frac{K_{EV0}}{1 + p_1 p_2 \exp(-j\omega t_v)}, \quad (2.18)$$

$$\underline{K}_{KS\Sigma}(j\omega) = \frac{K_{KS0}}{1 + p_1 p_2 \exp(-j\omega t_v)}, \quad (2.19)$$

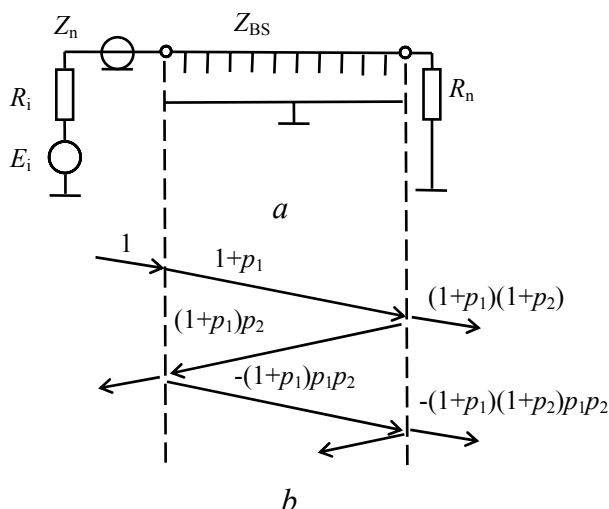
$$K_{EV0} = 1 + p_1, \quad (2.20)$$

$$K_{KS0} = (1 + p_1)(1 + p_2); \quad (2.21)$$

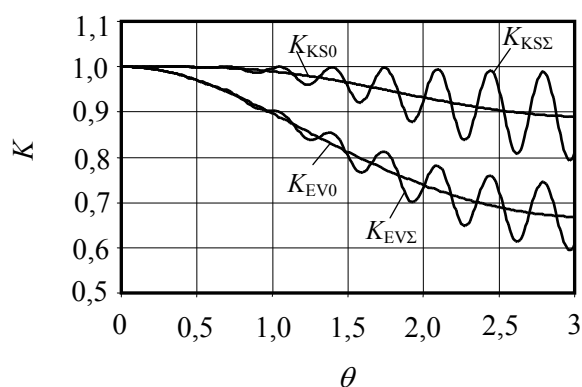
čia p_1 ir p_2 – įtampos atspindžio koeficientai nuo sistemos įėjimo ir išėjimo; t_v – vėlinimo lėtinimo ir kreipimo sistemoje trukmė.

2.4 paveiksle atvaizduotos elektroninio vamzdžio ir lėtinimo ir kreipimo sistemos dažninės amplitudės charakteristikos, apskaičiuotos, kai nominali trakto banginė varža $Z_n = 100 \Omega$, $Z_{BS}(0) = 100 \Omega$ ir $Z_{BS}(\pi) = 37 \Omega$ ir $t_v / \tau_v = N = 10$; čia τ_v – vėlinimo trukmė lėtinimo ir kreipimo sistemos vijoje, N – vijų skaičius. Siekiant apibendrinimo, abscisių ašyje atidėtas dydis $\theta = \omega \tau_v$. Kreivių $K_{EV\Sigma}(\theta)$ ir $K_{KS\Sigma}(\theta)$ virpesius lemia daugkartiniai atspindžiai nuo lėtinimo ir

kreipimo sistemos išėjimo ir įėjimo. Kreivės



2.3 pav. Signalinis traktas (*a*) ir bangos daugkartinių atspindžių diagrama (*b*)



2.4 pav. Signalinio trakto su kreipimo sistema ir elektroninio vamzdžio dažninės charakteristikos

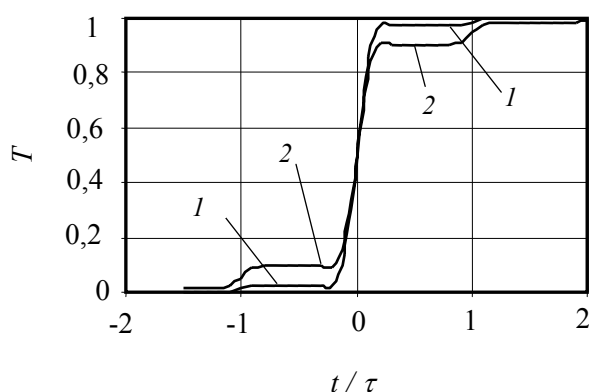
$K_{\text{EVO}}(\theta)$ ir $K_{\text{KS0}}(\theta)$ apibūdina krintančiosios įtampos bangos perdavimą. Jos gautos nevertinant daugkartinių atspindžių. Charakteristikų palyginimas rodo, kad dėl spiralinės lėtinimo ir kreipimo sistemos banginės varžos mažėjimo, didėjant fazės kampui θ ir dažniui elektroniniame vamzdyje, gaunami daug didesni dažniniai iškreipymai nei jo signaliniame trakte. Negana to, dažninius iškreipimus signaliniame trakte galima dar labiau sumažinti panaudojant lėtinimo ir kreipimo sistemos įvaduose ketvirčio bangos transformatorius [159].

2.5 paveiksle atvaizduotos perdavimo funkcijas (2.18)–(2.21) atitinkančios pereinamosios charakteristikos. Vamzdžio pereinamoji charakteristika yra laiptelių pavidalo. Laiptelio trukmė lygi vėlinimo trukmei τ_v lėtinimo ir kreipimo sistemos vijoje ir laikui τ , per kurį elektronas įveikia lėtinimo ir kreipimo sistemos periodą. Laiptelių aukščiai priklauso nuo banginių laidumų $Y(\pi)$ ir $Y(0)$ santykio. Šiam santykiui didėjant, laiptelių, atsirandančių prieš pereinamosios charakteristikos frontą ir už jo, aukštis didėja [6, 163]. Pereinamosios charakteristikos fronto statumą riboja baigtinis viršutinis integravimo, atliekamo skaičiuojant pereinamąją charakteristiką, režis.

Dėl pereinamosios charakteristikos laiptelių, veikiant kitiems veiksniams, sukeliantiems dažninius iškreipimus, sumažėja pereinamosios charakteristikos fronto pradinės ir galinės dalies statusas ir padidėja jos kilimo trukmė nuo lygio 0,1 iki 0,9. Nagrinėjamu atveju laiptelių aukštis yra apie 0,1. Todėl galime sakyti, kad dėl banginės varžos priklausomybės nuo dažnio elektroninio vamzdžio pereinamosios charakteristikos kilimo trukmė būtų apytikriai lygi $\tau_v = \tau$.

Signalinio trakto pereinamosios charakteristikos laiptelių praktiškai galima nepaisyti net tada, kai $Y(\pi)$ ir $Y(0)$ santykis gana didelis.

Taigi banginės varžos priklausomybė nuo dažnio turi didelę įtaką elektroninio vamzdžio dinaminėms charakteristikoms. Jos įtaka signalinio trakto charakteristikoms nedidelė ir ją dar



2.5 pav. Signalinio trakto (1 kreivė) ir elektroninio vamzdžio (2 kreivė) pereinamosios charakteristikos, apskaičiuotos įvertinant banginės varžos kitimą

galima sumažinti panaudojant junges, kurios veikia kaip ketvirčio bangos suderinimo transformatoriai [159].

Dar pažymėtina, kad elektroninio vamzdžio suderinimo su oscilografo signaliniu traktu kokybė labai priklauso nuo lėtinimo ir kreipimo sistemos įvadų reaktyvumų. Žinant reaktyvumų priežastis, jų būtų galima išvengti. Tačiau tos priežastys dažniausiai lieka neidentifikuotos. Todėl reaktyvumų įtakos išsamiau nenagrinėsime. Tik pažymėsime, kad elektroninio vamzdžio praleidžiamųjų dažnių

juostai ir pereinamosios charakteristikos kilimo trukmei turi įtakos reaktyvumai vamzdžio signalinio trakto pradžioje, o signalinio trakto charakteristikoms – reaktyvumai trakto pradžioje ir gale.

2.1.4 Kreipiančiojo elektrinio lauko įtaka

Lėtinimo ir kreipimo sistemose sklinda paviršinio pobūdžio elektromagnetinės bangos. Didėjant dažniui, elektrinio lauko stiprumas kinta ir tampa priklausomas nuo skersinės koordinatės. Dėl to atsiranda dažninių ir netiesinių tiriamųjų signalų formos vamzdžio ekrane iškraipymų. Be to, kaip jau buvo minėta, dėl lėtinimo ir kreipimo sistemos diskretiškumo pasireiškia lėkio efektas. Elektroną veikiančio (kreipiančiojo) elektrinio lauko stiprumą galime rasti apskaičiavę elektrinio lauko pasiskirstymą kreipimo zonoje ir suradę skersinės elektrinio lauko dedamosios nulinę erdvinę harmoniką. Atlikdami orientacinius skaičiavimus, kreipiančiojo elektrinio lauko priklausomybę nuo dažnio ir skersinės koordinatės y galime aproksimuoti formule

$$K_{EV45}(\omega) = K_{EV4}(\omega)K_{EV5}(\omega); \quad (2.22)$$

čia $K_{EV4}(\omega)$ įvertina lėkio efektą, $K_{EV5}(\omega)$ – paviršinį elektromagnetinio lauko pobūdį. Perdavimo funkcijos $K_{EV4}(\omega)$ ir $K_{EV5}(\omega)$ išreiškiamos formulėmis

$$K_{EV4}(\omega) = \frac{\sin(\omega\tau/2)}{\omega\tau/2} = \frac{\sin(\theta/2)}{\theta/2}, \quad (2.23)$$

$$K_{EV5}(\omega) = \frac{\theta w/L}{\sinh(\theta w/L)} \cosh(\theta y/L); \quad (2.24)$$

čia w – tarpas tarp nesimetinės lėtinimo ir kreipimo sistemos lėtinimo elektrodo ir ekrano, L – lėtinimo elektrodo žingsnis.

Tarę, kad $w = L$ ir elektronų pluoštas į lėtinimo ir kreipimo sistemą patenka kreipimo kanalo viduryje ($y_0 = w/2$), gautume, kad tada, kai $\theta = \pi$, perdavimo funkcijų $K_{EV4}(\omega)$ ir $K_{EV5}(\omega)$ vertės apytikriai vienodos. Kai tarpas w mažesnis, elektromagnetinio lauko paviršinio pobūdžio įtaka elektroninio vamzdžio dažninėms savybėms mažesnė nei lėkio efekto įtaka.

Perdavimo funkciją (2.23) atitinka pereinamoji charakteristika

$$T_{EV4}(t) = (t + \tau/2) \cdot 1(t + \tau/2) - (t - \tau/2) \cdot 1(t - \tau/2); \quad (2.25)$$

čia $1(t)$ – vienetinė funkcija.

Pereinamosios charakteristikos kilimo trukmė

$$t_{rEV4} = 0,8\tau. \quad (2.26)$$

Kai $y_0 = w/2$, (2.24) formule išreiškiamą perdavimo funkciją atitinka pereinamoji charakteristika

$$T_{EV5}(t) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \tanh \pi \frac{L}{w} \frac{t}{\tau}. \quad (2.27)$$

Jos kilimo trukmė

$$t_{EV5} \cong 0,7 \frac{w\tau}{L}. \quad (2.28)$$

Kai $w \leq L$, tai $t_{EV5} \leq 0,7\tau$.

Pereinamųjų charakteristikų $T_{EV4}(t)$ ir $T_{EV5}(t)$ pobūdis atvaizduotas 2.6 paveiksle.

Remdamiesi išdėstytais samprotavimais,

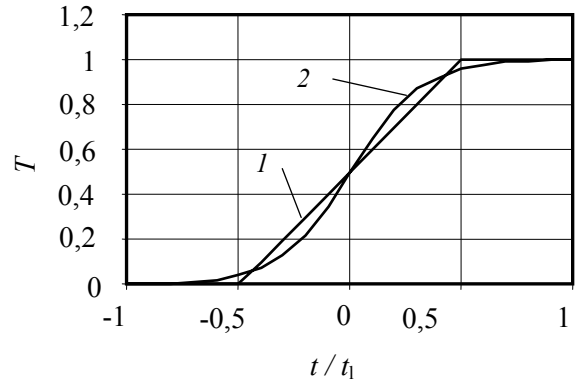
galime teigti, kad dėl lėkio efekto ir kreipiančiojo elektrinio lauko paviršinio pobūdžio elektroninio vamzdžio pereinamosios charakteristikos kilimo trukmė esti $(0,8...1,06)\tau$. Pagal [6, 44] lėkio trukmė τ turi būti ne didesnė kaip $0,32t_r^*$. Tuomet galime sakyti, kad $t_{EV4} \cong 0,26t_r^*$, $t_{EV5} \leq 0,22t_r^*$, $t_{EV45} \cong (0,26...0,34)t_r^*$.

Verta priminti, kad elektrinio lauko paviršinis pobūdis mažiau pasireiškia simetrinėse lėtinimo ir kreipimo sistemose.

Signalinio trakto dinaminėms charakteristikoms lėkio reiškinys ir paviršinis elektromagnetinio lauko pobūdis neturi įtakos.

Įvairių veiksnių įtaką elektroninio vamzdžio ir jo signalinio trakto dinaminėms savybėms, kai tenkinami reikalavimai [6, 44], iliustruoja žinios, pateiktos 2.1 lentelėje.

Visų veiksnių įtaką pereinamosios charakteristikos kilimo trukmei galime įvertinti taikydami formulę



2.6 pav. Elektroninio vamzdžio pereinamosios charakteristikos, sudarytos įvertinant lėkio efektą (1 kreivė) ir paviršinį elektrinio lauko pobūdį (2 kreivė)

2.1 lentelė. Veiksniai, įtakoiantys elektroninio vamzdžio ir jo signalinio trakto dinamines savybes

Veiksny	Pereinamosios charakteristikos kilimo trukmė	
	Signalinis traktas	Elektroninis vamzdis
Vėlinimo lėtinimo ir kreipimo sistemoje dispersija	$1,12t_r^*$	$0,78t_r^*$
Slopinimas lėtinimo ir kreipimo sistemoje	$0,65t_r^*$	$0,32t_r^*$
Banginės varžos priklausomybė nuo dažnio	~ 0	$\leq 0,4t_r^*$
Lėkio efektas, EM lauko paviršinis pobūdis	0	$0,34t_r^*$
Atsižvelgiant į visus veiksnys	$\approx 1,3t_r^*$	$\leq t_r^*$

$$t_r \cong \sqrt{\sum_i t_{ri}};$$

čia t_{ri} – pereinamosios charakteristikos kilimo trukmė, atsižvelgiant į i -ąjį veiksnį.

Taigi elektroninio vamzdžio ir jo signalinio trakto dinamines charakteristikas lemia skirtingi veiksniai.

2.2 Elektronų pluošto kreipimo skaičiavimas ir netiesinių iškraipymų analizė

2.2.1 Kreipiančiojo elektrinio lauko pasiskirstymas

Pradžioje panagrinėkime plokščią nesimetrinę nedispersinę spiralinę lėtinimo ir kreipimo sistemą. Kreipiančiojo elektrinio lauko pasiskirstymui tokioje sistemoje apskaičiuoti galima taikyti analitinius ir skaitinius metodus.

Taikant analitinį elektrodinaminį metodą, spiralę modeliuojama anizotropiškai laidžia plokštuma. Gaunama tokia elektronų pluoštą kreipiančios (elektrinio lauko skersinės) dedamosios amplitudės išraiška [6]:

$$E_{ym} = \frac{U_m}{w} \frac{kw}{\sinh(kw)} \cosh(ky); \quad (2.29)$$

čia U_m – kreipimo įtampos amplitudė, $k = \omega / v_f$ – bangos skaičius, ω – kampinis dažnis, v_f – fazinis elektromagnetinės bangos greitis lėtinimo ir kreipimo sistemos išilginės ašies kryptimi, w – atstumas tarp spiralės ir jos ekrano, y – skersinė koordinatė.

Anizotropinės plokštumos pavidalo spiralės modelis neatspindi spiralės diskrečiosios struktūros. Realioje lėtinimo ir kreipimo sistemoje elektronas spiralės žingsnį L įveikia per laiką $\tau = L / v_f$. Lėkio reiškinio įtaką galima įvertinti laikant, kad bėgančiosios bangos lėtinimo ir kreipimo sistema sudaryta iš nuosekliai išdėstytų elementarių kreipimo sistemų, kurių vaidmenį atlieka spiralės vijos. Tuomet lėkio įtaka išreiškiama koeficientu [177]

$$K_1 = \frac{\sin(\omega\tau/2)}{\omega\tau/2} = \frac{\sin(\theta/2)}{\theta/2}; \quad (2.30)$$

čia τ – laikas, per kurį elektronas įveikia vieną elementariąją kreipimo sistemą, θ – lėkio trukmę atitinkantis fazės kampas.

Atsižvelgiant į (2.29) ir (2.30), kreipiančiojo elektrinio lauko stiprumo išraiška įgyja tokį pavidalą:

$$E_{ym} = EK_1 \frac{\theta w / L}{\sinh(\theta w / L)} \cosh(\theta y / L); \quad (2.31)$$

čia $E = U_m / w$ – kreipiančiojo elektrinio lauko stiprumas žemųjų dažnių srityje.

Kreipiančiojo elektrinio lauko stiprumo pasiskirstymo kitimą didėjant dažniui ir fazės kampui θ , iliustruoja 2.7 paveikslo kreivės. Didėjant dažniui ir fazės kampui θ , elektromagnetinis laukas lėtinimo ir kreipimo sistemoje, kaip žinoma [6, 44, 50], įgyja paviršinį pobūdį. Elektrinio lauko stiprumas tampa priklausomas nuo skersinės koordinatės. Prie lėtinimo elektrodo jis didžiausias. Didėjant nuotoliui nuo lėtinimo elektrodo, lauko stiprumas mažėja.

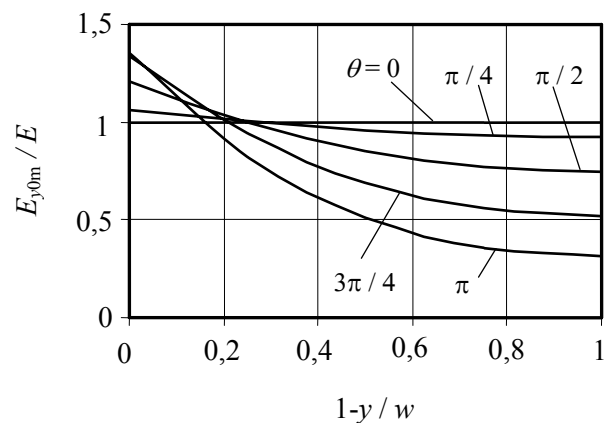
Deja, praktikoje spiralės vijos plotis esti mažesnis nei žingsnis. Tada elektrinio lauko sklaidai įvertinti vartojama ekvivalentinio vijos pločio sąvoka, tačiau geros ekvivalentinio pločio skaičiavimo metodikos nėra.

Diskretusis lėtinimo ir kreipimo sistemos pobūdis įvertinamas taikant kitą analitinį – daugialaidžių linijų – metodą. Tada, atsižvelgiant į periodinį sistemos pobūdį ir taikant Floke (*Floquet*) teoremą, elektrinio lauko skersinės dedamosios kompleksinė amplitudė išreiškiama erdviųjų harmonikų suma [26, 44]:

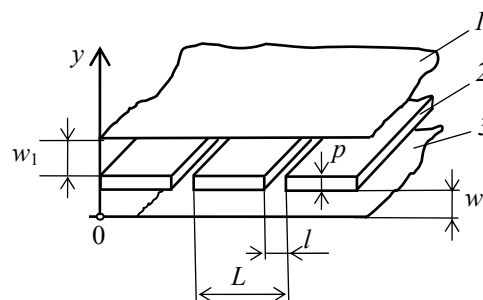
$$\underline{E}_{ym}(x, y, z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \underline{E}_{ymn}(x, y) e^{-jk_n z}; \quad (2.32)$$

čia n – sveikasis skaičius, $\underline{E}_{ymn}(x, y)$ – elektrinio lauko skersinės dedamosios n -osios erdvinės harmonikos kompleksinė amplitudė, $k_n = k + 2\pi n / L$ – n -osios erdvinės harmonikos bangos skaičius z ašies kryptimi.

Bėgančiosios bangos elektroniniuose vamzdžiuose elektronų greitis z ašies kryptimi suderinamas su nulinės erdvinės harmonikos sklaidimo greičiu. Kitų erdviųjų harmonikų sklaidimo greičiai labai skiriasi nuo elektronų greičio. Todėl galima sakyti, kad elektronų pluoštą kreipia elektrinio lauko skersinės dedamosios nulinė erdvinė harmonika. Nagrinėjant spiralinę sistemą modeliuojančios daugialaidės linijos (2.8 pav.) elektromagnetinį lauką, remiantis [26, 44, 50], galima gauti tokia



2.7 pav. Kreipiančiojo elektrinio lauko stiprumo pasiskirstymo kitimas spiralinėje lėtinimo ir kreipimo sistemoje didėjant fazės kampui θ , kai $L = 2,2$, $l = 0,6$, $w = 1,5$ mm



2.8 pav. Daugialaidės linijos, modeliuojančios spiralinę sistemą, fragmentas:
1, 3 – ekranai; 2 – daugialaidės linijos laidininkas

elektrinio lauko skersinės dedamosios nulinės erdvinės harmonikos amplitudės išraišką:

$$E_{y0m}(y) = K_2 E_{ym}; \quad (2.33)$$

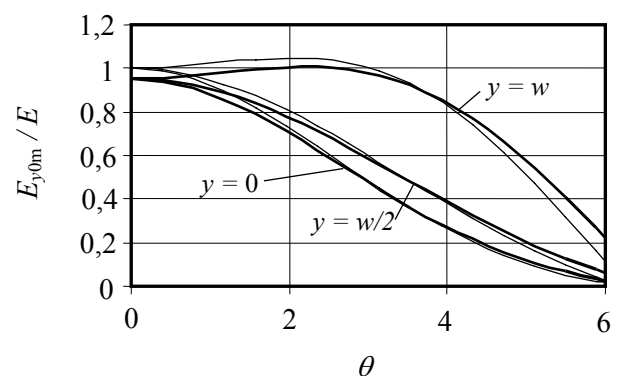
čia

$$K_2(\theta) = \frac{\sin(\theta l / 2L)}{\theta l / 2L}. \quad (2.34)$$

Taigi kreipiančiojo elektrinio lauko stiprumo išraiškos, gautos taikant elektrodinaminį ir daugialaidžių linijų metodus, skiriasi tik daugikliu K_2 . Kai tarpas l tarp spiralę modeliuojančių daugialaidės linijos laidininkų mažas, šis daugiklis beveik lygus 1. Tuomet, taikant aptartąsias kreipiančiojo elektrinio lauko stiprumo skaičiavimo metodikas, gaunami beveik vienodi rezultatai. Tačiau reikia pasakyti, kad (2.34) išraiška yra gauta taikant modelį, kuriame daugialaidės linijos laidininkai stori, o tarpai tarp jų maži.

[142] parodyta, kad bendriausiu atveju kreipiančiojo elektrinio lauko pasiskirstymui apskaičiuoti taikytini skaitiniai metodai. Kita vertus, nesunku įsitikinti, kad, nagrinėjant 2.8 paveiksle atvaizduotą lėtinimo ir kreipimo sistemos modelį, skaičiavimų rezultatai, gaunami taikant (2.33), (2.31) išraiškas ir skaitinį baigtinių skirtumų metodą, kai $l/L \leq 0,1$ ir $p/L \geq 0,2$, beveik sutampa. Kaip matyti iš 2.9 paveikslo, jie nedaug skiriasi net tuo atveju, kai $l/L \cong 0,25$ ir $p/L \cong 0,1$. Todėl čia, siekdami paprastesniu būdu įvertinti netiesinius iškreipymus, atsirandančius didėjant dažniui paprastoje spiralinėje lėtinimo ir kreipimo sistemoje, kreipiančiojo elektrinio lauko stiprumui apskaičiuoti taikysime (2.33) ir (2.31) formules. Sudėtingesnio profilio, pavyzdžiui, lovelinių sistemų, atvejais nėra tinkamų analitinių kreipiančiojo elektrinio lauko išraiškų, todėl, kaip ir [142], gali būti taikomas baigtinių skirtumų metodas.

Dar reikia pridurti, kad bendruoju atveju iškreipymus bėgančiosios bangos lėtinimo ir kreipimo sistemoje gali sukelti ir kitos elektromagnetinio lauko dedamosios. Tačiau skersinės elektromagnetinio lauko dedamosios E_x srityje, kur praleidžiamas elektronų pluoštas, išvengiama tinkamai parinkus lėtinimo elektrodo laidininkų kryptį. Išilginės dedamosios E_z poveikis elektronų pluoštui mažas [8] – išilginį elektronų greitį lemia palyginti didelė elektronų greitinimo įtampa



2.9 pav. Elektrinio lauko nulinės erdvinės harmonikos stiprumo priklausomybės nuo fazės kampo θ , apskaičiuotos taikant (2.5) (plonos linijos) ir baigtinių skirtumų metodą (storesnės linijos), kai $L = 2,2$, $l = 0,6$, $w = 1$, $w_1 = 0,4$, $p = 0,2$ mm

U_0 . Todėl čia į elektromagnetinio lauko dedamąsias E_x ir E_z neatsižvelgsime.

2.2.2 Elektronų pluošto kreipimo apskaičiavimas

Žinant elektrinio lauko stiprumą, elektronų pluošto poslinkį vamzdžio ekrane galima rasti sprendžiant diferencialinę lygtį [43]:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{e}{m} E_y; \quad (2.35)$$

čia e – elektrono krūvio modulis, m – elektrono masė.

Kai elektrinio lauko stiprumas priklauso nuo koordinatės, elektronų pluošto poslinkį vamzdžio ekrane galima rasti laikant, kad bėgančiosios bangos lėtinimo ir kreipimo sistema sudaryta iš N elementarių dalių, elektronų poslinkis elementarioje kreipimo sistemoje yra mažas ir kreipiančiojo elektrinio lauko stiprumo kitimo elektronui lekiant elementaria kreipimo sistema galima nepaisyti. Skaičiuojant verta imti, kad elementarių sistemų skaičius lygus spiralinės lėtinimo ir kreipimo sistemos periodų (vijų), o meandrinės sistemos – pusperiodžių skaičiui.

Padarius nurodytas prielaidas, elektronų pluošto elektrono poslinkio, kurį sukelia lėtinimo ir kreipimo sistema sklindančio harmoninio virpesio įtampos sukeltas elektrinis laukas, skaičiavimo algoritmas supaprastėja:

1. Atsižvelgiant į elektrono įlėkimo į lėtinimo ir kreipimo sistemą laiko momentą, įėjimo įtampos dažnį ir elektrono pradinę koordinatę y_0 , remiantis (2.33) ir (2.31) formulėmis, apskaičiuojamas elektroną kreipiančio elektrinio lauko stiprumas po pirmąją lėtinimo ir kreipimo sistemos vija;
2. Taikant (2.35) randamas po pirmąją vija elektrono įgytas skersinis greitis ir poslinkis;
3. Atsižvelgiant į elektrono pradinę koordinatę ir poslinkį, randamas elektrinio lauko stiprumas po gretimą vija. Taikant (2.35) ir atsižvelgiant į pradines sąlygas, randamas elektrono įgytas skersinis greitis ir jo poslinkis;
4. Suradus visoje lėtinimo ir kreipimo sistemoje elektrono įgytą skersinį greitį v_Σ ir jo poslinkį y_Σ , elektrono poslinkis vamzdžio ekrane apskaičiuojamas formule

$$H = y_\Sigma + v_\Sigma t_e; \quad (2.36)$$

čia t_e – elektrono lėkio nuo lėtinimo ir kreipimo sistemos galo iki vamzdžio ekrano (nuotolis l_e) trukmė.

Remiantis aptarta logika, galima išvesti tokias v_Σ ir y_Σ analitines išraiškas:

$$v_\Sigma = \sum_{i=1}^N v_i, \quad (2.37)$$

$$y_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N \Delta y_i - y_0; \quad (2.38)$$

čia

$$v_i = \frac{e}{m} E_y(y_{i-1}) \tau, \quad (2.39)$$

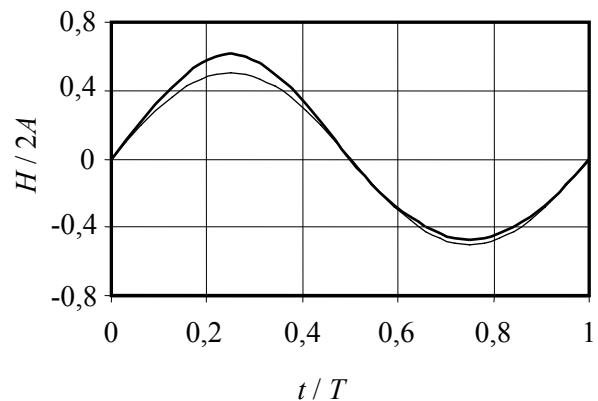
$$\Delta y_i = v_{i-1} \tau + \frac{e}{m} E_y(y_{i-1}) \frac{\tau^2}{2}. \quad (2.40)$$

(2.9)–(2.12) formulėse v_i yra i -ojoje lėtinimo ir kreipimo sistemos dalyje elektrono įgytas skersinis greitis, Δy_i – elektrono poslinkis šioje sistemos dalyje.

2.2.3 Harmoninių virpesių formos iškraipymai nesimetrinėje spiralinėje lėtinimo ir kreipimo sistemoje

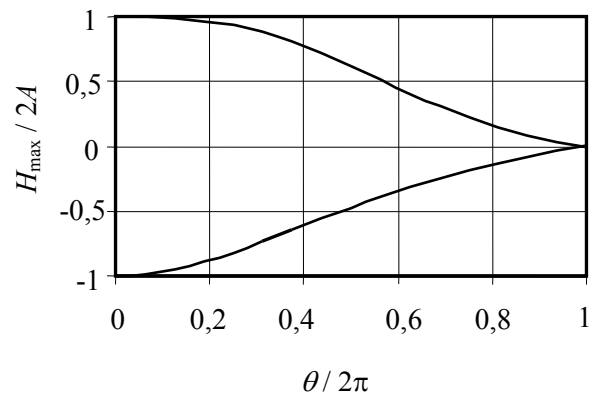
Nesimetrinėse spiralinėse lėtinimo ir kreipimo sistemose elektronų pluoštas praleidžiamas tarp spiralės ir išorinio ekrano. Sakykime, kad remiantis 2.8 paveikslu elektronų pluošto pradinė koordinatė yra $y_0 = w/2$. Tada, veikiant aukštojo dažnio harmoniniam virpesiui, teigiamojo pusperiodžio metu elektronų pluoštas artėja prie lėtinimo elektrodo, kur kreipiančiojo elektrinio lauko stiprumas didesnis. Neigiamojo pusperiodžio metu elektronų pluoštas kreipiamas priešinga kryptimi, kur elektrinio lauko stiprumas mažesnis. Dėl kreipiančiojo elektrinio lauko stiprumo priklausomybės nuo koordinatės y gaunami virpesio vaizdo vamzdžio ekrane netiesiniai iškraipymai. 2.10 paveiksle parodytas harmoninio virpesio vaizdas vamzdžio ekrane (plona linija), kuris būtų gautas, jeigu elektrinio lauko stiprumas nepriklausytų nuo koordinatės (būtų lygus $E_y(y_0)$) ir iškraipytas harmoninio virpesio vaizdas (storesnė linija). Grafiko vertikaliojoje ašyje atidėtas santykis $H/2A$; čia $2A$ yra vamzdžio ekrano darbinės dalies matmuo y ašies kryptimi. Šis darbinės dalies matmuo apskaičiuojamas atsižvelgiant į tai, kad elektronų pluoštas lėtinimo ir kreipimo sistemoje neturi kliudyti kreipimo elektrodų.

Netiesinių iškraipymų lygis priklauso nuo kreipimo įtampos amplitudės ir dažnio. Didėjant virpesių amplitudei, iškraipymai didėja. Tačiau net jeigu kreipiančiosios įtampos amplitudė tokia, kad žemojo dažnio virpesio oscilograma



2.10 pav. Apskaičiuotas virpesio vaizdas vamzdžio ekrane, kai $\theta = \pi$, $L = 2,2$, $l = 0,2$, $w = 1 \text{ mm}$, $N = 20$, $U_0 = 1,5 \text{ kV}$, $l_e = 0,2 \text{ m}$

užima visą ekrano darbinę dalį, netiesinių iškreipimų dėl aptariamų priežasčių nebūna, kai virpesių dažnis žemas, nes žemųjų dažnių srityje kreipiančiojo elektrinio lauko stiprumas nuo koordinatės y nepriklauso (2.7 pav.) ir kai dažnis didelis (θ artimas 2π), nes tada vamzdžio jautris taip sumažėja, kad elektronų pluošto poslinkis lėtinimo ir kreipimo sistemoje yra mažas ir elektroną veikiantis elektrinis laukas beveik nekinta. Šią mintį iliustruoja 2.11 paveikslo kreivės, vaizduojančios maksimalaus elektronų pluošto poslinkio ekrane (gaunamo, veikiant kreipimo įtampos vertėms U_m ir $-U_m$) priklausomybes nuo fazės kampo θ .



2.11 pav. Maksimalaus elektronų pluošto poslinkio ekrane priklausomybė nuo fazės kampo θ , kai $L = 2,2$, $l = 0,2$, $w = 1$ mm, $N = 20$, $U_0 = 1,5$ kV, $l_e = 0,2$ m

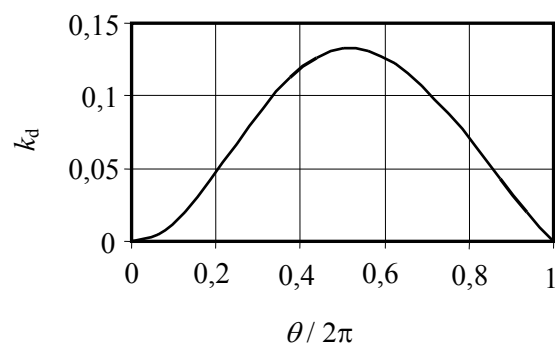
Kiekybiškai netiesiniai iškreipimai apibūdinami netiesinių iškreipimų koeficientu. Nesunku įsitikinti, kad nagrinėjamu atveju dėl elektrinio lauko stiprumo kitimo koordinatės y kryptimi, netiesinius iškreipimus lemia antroji harmonika ir netiesinių iškreipimų koeficientui skaičiuoti tinka formulė

$$k_d = \frac{H^+ - H^-}{H^+ + H^-};$$

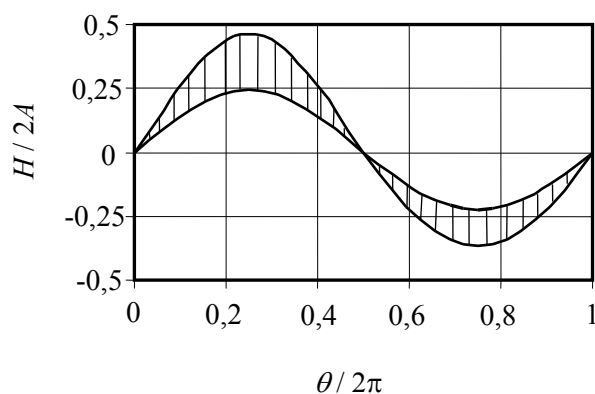
čia H^+ – maksimalus elektronų pluošto poslinkis ekrane y kryptimi; H^- – maksimalus poslinkis priešinga kryptimi.

Netiesinių iškreipimų koeficiento priklausomybės nuo fazės kampo θ pobūdį iliustruoja 2.12 paveikslas.

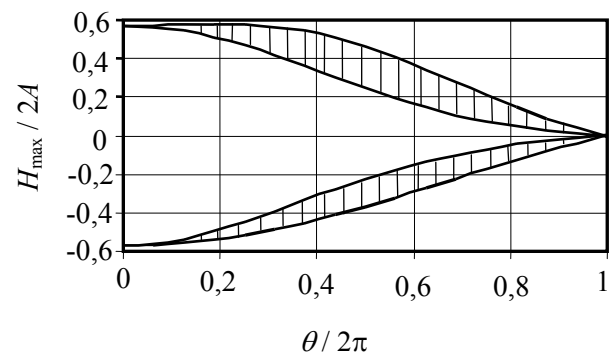
Praktikoje elektronų pluošto skersiniai matmenys lėtinimo ir kreipimo sistemoje nėra be galo maži. Tuomet, kai dažnis aukštas, elektronus, kurių pradinės koordinatės skiriasi, lėtinimo ir kreipimo sistemoje veikia skirtingo stiprumo kreipiantysis elektrinis laukas. Dėl šios priežasties, didėjant dažniui, elektronų pluoštas išsifokusuoja. 2.13 paveiksle pavaizduotos kreivės, kurias brėžtų vamzdžio ekrane elektronai, kurių pradinės koordinatės



2.12 pav. Netiesinių iškreipimų priklausomybė nuo fazės kampo θ , kai $L = 2,2$, $l = 0,2$, $w = 1$ mm, $N = 20$, greitinimo įtampa $U_0 = 1,5$ kV, nuotolis nuo kreipimo sistemos iki vamzdžio ekrano – 0,2 m



2.13 pav. Apskaičiuotas virpesio vaizdas ekrane, kai $\theta = \pi$, $y_0 = (1...3)w/4$, $L = 2,2$, $l = 0,2$, $w = 1$ mm, $N = 20$, $U_0 = 1,5$ kV, $l_e = 0,2$ m



2.14 pav. Elektronų pluošto maksimalaus poslinkio vamzdžio ekrane sklaida dėl kreipiančiojo elektrinio lauko paviršinio pobūdžio, kai $y_0 = (1...3)w/4$, $L = 2,2$, $l = 0,2$, $w = 1$ mm, $N = 20$, $U_0 = 1,5$ kV, $l_e = 0,2$ m

$y_0 = w/4$ ir $y_0 = 3w/4$. 2.14 paveikslas

ilustruoja elektronų pluošto išsifokusavimo priklausomybę nuo fazės kampo θ .

Remiantis skaičiavimų rezultatais galima teigti, kad netiesiniai iškraipymai ir vaizdo išsifokusavimas bėgančiosios bangos elektroniniuose vamzdžiuose su nesimetrinėmis lėtinimo ir kreipimo sistemomis gali būti palyginti dideli. Žinomuose literatūros šaltiniuose [7] buvo atskleistos tik antraeilės netiesinių iškraipymų ir išsifokusavimo priežastys.

2.2.4 Netiesinių iškraipymų mažinimo galimybės

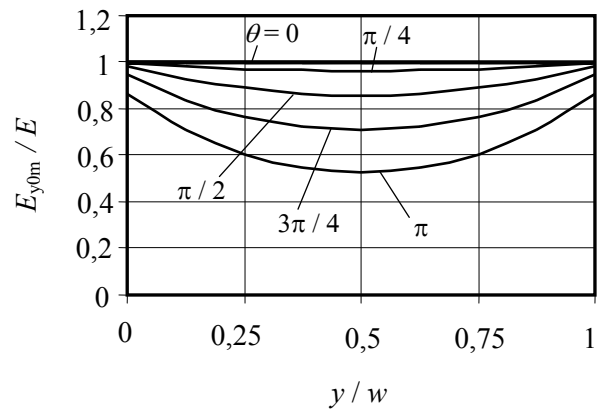
Didėjant dažniui nesimetrinėse spiralinėse lėtinimo ir kreipimo sistemose kylančius netiesinius iškraipymus galima sumažinti slopinant elektromagnetinio lauko paviršinį pobūdį – mažinant sistemos skersinius matmenis ir lėtinimo koeficientą. Tačiau mažų matmenų lėtinimo ir kreipimo sistemą ir elektroninį vamzdį sunkiau pagaminti. Be to, mažėjant tarpui tarp kreipimo elektrodų, mažėja vamzdžio ekrano darbinė dalis. Kai lėtinimo koeficientas mažesnis, reikia aukštesnės elektronų greitinimo įtampos, taigi sumažėja vamzdžio jautris.

Paviršinį elektromagnetinio lauko pobūdį lemia tai, kad, didėjant dažniui, didėja gretimų vijų įtampų fazių skirtumas ir stiprėja tarp vijų veikiantis elektrinis laukas. Elektrinio lauko tarp gretimų vijų kitimą galima sumažinti tarp vijų sudarant ekranavimo sienelės – panaudojant lovelines sistemas [6, 148]. Taigi, tiek siekiant platesnės praleidžiamųjų dažnių juostos, tiek norint sumažinti netiesinius iškraipymus, kurie kyla didėjant dažniui, perspektyviausiomis nesimetrinėmis bėgančiosios bangos lėtinimo ir kreipimo sistemomis laikytinos lovelinės spiralinės ir meandrinės sistemos arba net sistemos, kuriose ekranavimo sienelės yra už srities, kurioje praleidžiamas

elektronų pluoštas, ribų ir visiškai ekranuoja gretimą lėtinimo ir kreipimo sistemos vijas [132, 135].

Simetrinių bėgančiosios bangos lėtinimo ir kreipimo sistemų trūkumas – sudėtingesnė konstrukcija. Todėl didžiausios spartos elektroniniuose vamzdžiuose taikytos nesimetrinės sistemos [47]. Kita vertus, simetrinės sistemos turi privalumų. [6, 178] parodyta, kad tuo atveju, kai simetrinėje lėtinimo ir kreipimo sistemoje sužadinama nelyginė banga, šios sistemos savybės nepasikeistų, jeigu simetrijos plokštumoje būtų

sudaryta elektrinė sienelė – idealiai laidus ekranas. Tarpas tarp tokio ekrano ir lėtinimo elektrodo yra dvigubai mažesnis už tarpą tarp kreipimo elektrodų. Atsižvelgiant į šią aplinkybę apskaičiuotas kreipiančiojo elektrinio lauko stiprumo pasiskirstymas simetrinėje spiralinėje lėtinimo ir kreipimo sistemoje pavaizduotas 2.15 paveiksle. Palyginus 2.7 ir 2.15 paveikslus matyti, kad simetrinėje bėgančiosios bangos lėtinimo ir kreipimo sistemoje kreipiančiojo elektrinio lauko stiprumas didėjant dažniui kinta daug mažiau nei nesimetrinėje. Kai $\theta = \pi$, elektrinio lauko stiprumas nesimetrinės spiralinės lėtinimo ir kreipimo sistemos skerspjūvyje pakinta apie 4,3 karto. Tomis pačiomis sąlygomis simetrinėje lėtinimo ir kreipimo sistemoje kreipiančiojo elektrinio lauko stiprumas pakinta tik 1,6 karto.



2.15 pav. Kreipiančiojo elektrinio lauko stiprumo pasiskirstymo kitimas simetrinėje spiralinėje kreipimo sistemoje didėjant fazės kampui θ , kai $L = 2,2$, $l = 0,6$, $w = 0,75$ mm

2.3 Elektrinio lauko skersinės dedamosios priklausomybės nuo skersinės koordinatės įtaka elektroninio vamzdžio pereinamajai charakteristikai

2.3.1 Pereinamosios charakteristikos skaičiavimo metodika

Kai žinoma perdavimo funkcija, pereinamoji charakteristika skaičiuojama taikant formulę [42]

$$T(t) = \frac{K(0)}{2} + \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{K(\omega)}{\omega} \sin[\omega t + \varphi(\omega)] d\omega; \quad (2.41)$$

čia $K(\omega)$ ir $\varphi(\omega)$ – amplitudės ir fazės dažninės charakteristikos.

Kai signalas stiprus, (2.41) formulės taikymą komplikuoja tai, kad, elektronui lekiant lėtinimo ir kreipimo sistema, kinta jo skersinė koordinatė ir, kai dažnis aukštas, kinta kreipiančiojo elektrinio lauko stiprumas.

Kaip buvo minėta anksčiau, bėgančiosios bangos lėtinimo ir kreipimo sistemoje elektronų pluoštą kreipia skersinės elektrinio lauko dedamosios nulinė erdvinė harmonika. Jos amplitudė lėtinimo ir kreipimo sistemoje išreiškiama formule [6, 44, 45]

$$E_{y0m}(\theta, y) \cong EK_1(\theta)K_3(\theta); \quad (2.42)$$

čia

$$K_1(\theta) = \frac{\sin(\omega\tau/2)}{\omega\tau/2} = \frac{\sin(\theta/2)}{\theta/2},$$

$$K_3(\theta, y) = \frac{\theta w/L}{\sinh(\theta w/L)} \cosh(\theta y/L),$$

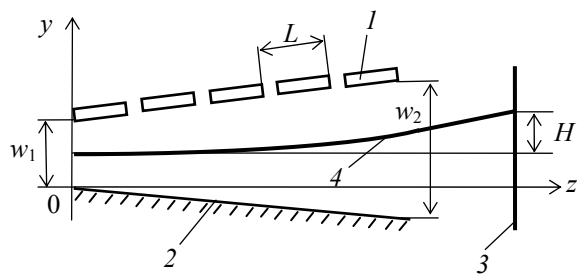
$E = U/w$ – kreipiančiojo elektrinio lauko stiprumas; U – zonduojančio įtampos šuolio aukštis; θ – fazės kampas, atitinkantis elektrono lėkio trukmę $\tau = L/v_0$; L – periodinės lėtinimo ir kreipimo sistemos laidininkų žingsnis (2.16 pav.); v_0 – elektrono išilginis greitis (z kryptimi), y – skersinė koordinatė (2.16 pav.).

Čia, nagrinėdami bėgančiosios bangos elektroninio vamzdžio pereinamosios charakteristikos skaičiavimą ir priklausomybę nuo kreipiančiojo elektrinio lauko pasiskirstymo lėtinimo ir kreipimo sistemoje, neatsižvelkime į slopinimą, atspindžius ir kitus veiksnius, kurių įtaka bėgančiosios bangos elektroninio vamzdžio savybėms pakankamai išsamiai išnagrinėta. Dar sakykime, kad elektronų ir elektromagnetinės bangos greičiai suderinti ($v_0 = v_f$; čia v_f – elektromagnetinės bangos fazinis greitis lėtinimo ir kreipimo sistemoje). Tada, remdamiesi (2.42), bėgančiosios bangos elektroninio vamzdžio perdavimo funkciją galime išreikšti formule

$$K(\theta, y) = K_1(\theta)K_3(\theta, y); \quad (2.43)$$

čia $\theta = \omega\tau$.

Taigi, bendruoju atveju, kreipiančiojo elektrinio lauko stiprumas ir vamzdžio perdavimo funkcija priklauso nuo skersinės koordinatės, kuri kinta kreipimo proceso metu. Jeigu tarpas tarp kreipimo elektrodų didėja z kryptimi (2.16 pav.), kreipiančiojo elektrinio lauko stiprumas bendruoju atveju priklauso nuo skersinės ir išilginės koordinatės.



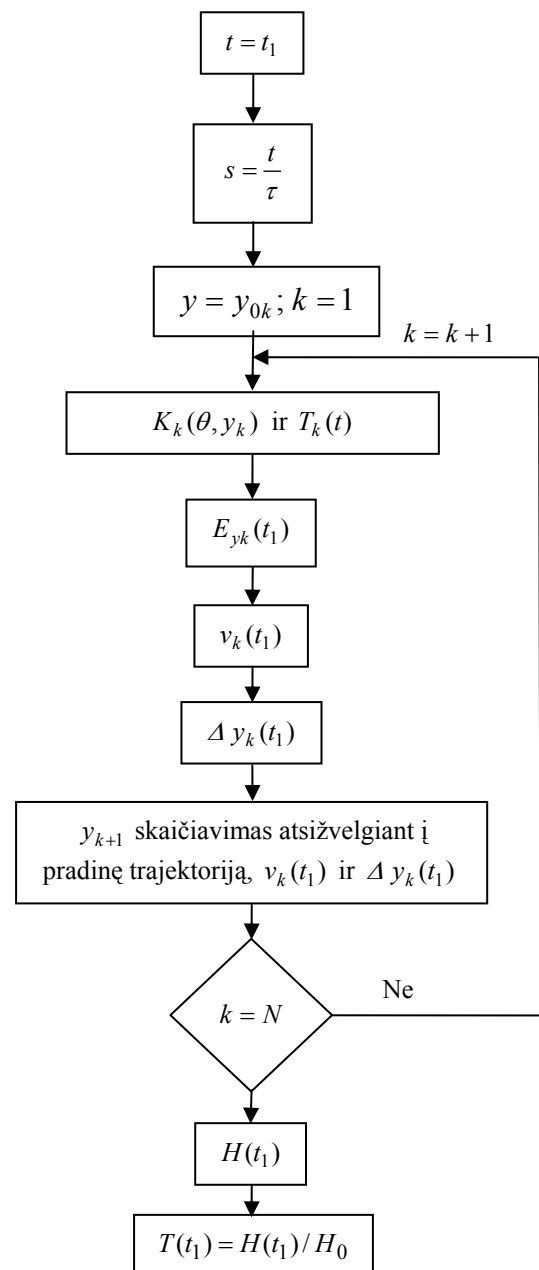
2.16 pav. Nesimetinės lėtinimo ir kreipimo sistemos modelis:

1 – kreipimo elektrodas; 2 – ekranas (simetrinėje kreipimo sistemoje – kitas kreipimo elektrodas); 3 – elektroninio vamzdžio ekranas; 4 – elektronų pluoštas

Kai elektrinio lauko stiprumas lėtinimo ir kreipimo sistemoje kinta kreipimo proceso metu, elektrono poslinkį vamzdžio ekrane $H(t)$ ir pereinamosios charakteristikos momentinę vertę $T(t)$ laiko momentu t galime rasti nagrinėdami periodinę lėtinimo ir kreipimo sistemą kaip sistemą, sudarytą iš N elementariųjų kreipimo sistemų; kiekvienoje iš jų elektrono skersinės koordinatės y ir tarpo tarp lėtinimo ir kreipimo elektrodų pokyčiai maži ir kreipiančiojo elektrinio lauko stiprumas praktiškai nekinta.

Atsižvelgiant į aptartus supaprastinimus, bėgančiosios bangos elektroninio vamzdžio pereinamosios charakteristikos skaičiavimo algoritmas gali būti toks:

1. Atsižvelgiant į elektrono pradinę koordinatę $y = y_{01}$ lėtinimo ir kreipimo sistemos įėjime ir taikant (2.43), apskaičiuojama pirmosios elementariosios kreipimo sistemos amplitudės dažninė charakteristika $K_1(\theta, y)$.
2. Taikant (2.41) apskaičiuojama $T_1(t_1)$ – pereinamosios charakteristikos reikšmė T_1 pasirinktu laiko momentu t_1 (zonduojančio šuolio momento atžvilgiu).
3. Atsižvelgiant į zonduojančio įtampos šuolio aukštį, tarpą tarp kreipimo elektrodų w_1 ir $T_1(t_1)$ apskaičiuojamas pirmojoje elementariojoje sistemoje elektrono įgytas skersinis greitis $v_1(t_1)$ ir skersinis poslinkis $\Delta y_1(t_1)$. Surandama elektrono skersinė koordinatė pirmosios elementariosios kreipimo sistemos gale ir antrosios elementariosios kreipimo sistemos pradžioje.
4. Kartojami 1–3 p. skaičiavimai. Skaičiuojant elektrono įgytą skersinį greitį atsižvelgiama į ankstesnėse elementariosiose sistemose elektrono įgytą skersinį greitį.
5. Radus suminį elektrono poslinkį ir suminį skersinį greitį lėtinimo ir kreipimo sistemoje, randamas elektrono, įlėkusio į lėtinimo ir



2.17 pav. Pereinamosios charakteristikos skaičiavimo tam tikru laiko momentu algoritmas

kreipimo sistemą laiko momentu t_1 , poslinkis vamzdžio ekrane

$$H(t_1) = \Delta y_{\Sigma}(t_1) + v_{\Sigma}(t_1)t_e - y_{01}; \quad (2.44)$$

čia $\Delta y_{\Sigma}(t_1)$ – visas elektrono poslinkis lėtinimo ir kreipimo sistemoje; $v_{\Sigma}(t_1)$ – visas elektrono įgytas skersinis greitis; t_e – elektrono lėkio nuo lėtinimo ir kreipimo sistemos galo iki vamzdžio ekrano trukmė.

6. Atitinkanti laiko momentą t_1 vamzdžio pereinamosios charakteristikos reikšmė randama iš formulės:

$$T(t_1) = H(t_1) / H_0; \quad (2.45)$$

čia H_0 – elektrono poslinkis vamzdžio ekrane veikiant nuolatinei įtampai U . Kartojant 1–6 p. skaičiavimus apskaičiuojamos pereinamosios charakteristikos reikšmės kitais pasirinktais laiko momentais.

Pradinė elektrono trajektorija gali nesutapti su tarpo tarp kreipimo elektrodų viduriu. Be to pradinė trajektorija priklauso nuo nuolatinės poslinkio įtampos. Bendru atveju pradinę trajektoriją galima aprašyti lygtimi:

$$Y_0 = y_{01} + az + bz^2; \quad (2.46)$$

čia a ir b – pastovūs koeficientai, kuriuos parenkant galima modeliuoti įvairius pradinės trajektorijos variantus. Į pradinę elektrono trajektoriją atsižvelgiama skaičiuojant elektrono koordinatę kiekvienos elementariosios kreipimo sistemos įėjime. Taigi nuo jos, taip pat nuo tarpo tarp kreipimo elektrodų kitimo remiantis (2.43) priklauso elementariosios kreipimo sistemos perdavimo funkcija ir pereinamoji charakteristika.

Pereinamosios charakteristikos reikšmės $T(t_1)$ skaičiavimo supaprastintas algoritmas atvaizduotas 2.17 paveiksle.

2.3.2 Pereinamųjų charakteristikų skaičiavimas ir analizė

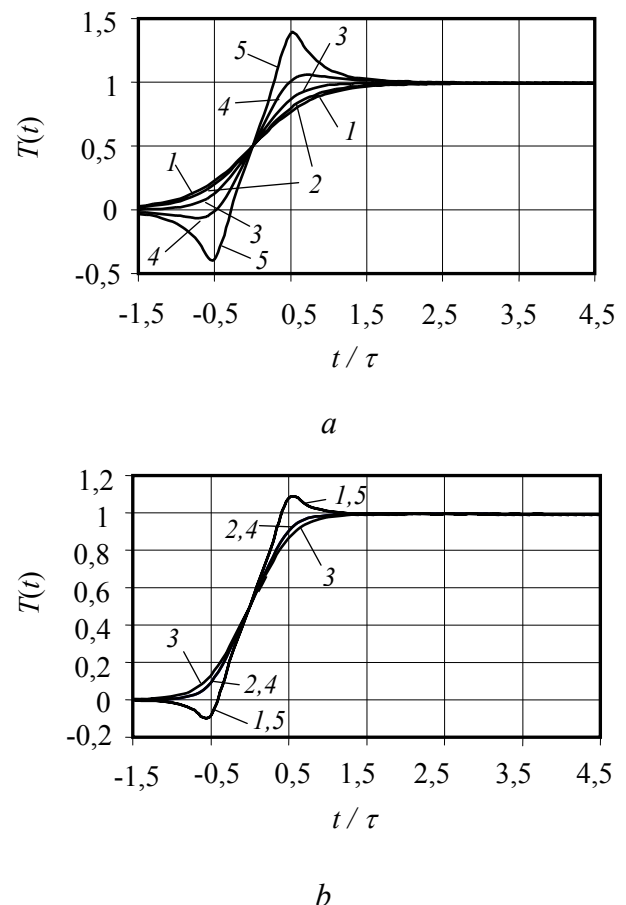
Elektrinio lauko stiprumo skersinės dedamosios priklausomybės nuo skersinės koordinatės y įtaka lėtinimo ir kreipimo sistemų pereinamosioms charakteristikoms silpno tiriamojo signalo atveju iliustruota 2.18 paveiksle. Čia pavaizduotos pereinamosios charakteristikos, gautos kai elektronų pluoštas į sistemos įėjimą patenka skirtingose skersinės koordinatės y vietose nesimetrinės (2.18 pav., a) ir simetrinės (2.18 pav., b) sistemų atvejais. Pereinamosios charakteristikos gautos, kai atstumas nuo lėtinimo ir kreipimo sistemos galo iki elektroninio vamzdžio ekrano l_e lygus 15 cm ir greitinančioji įtampa U_0 lygi 1,5 kV. Čia pradinė elektronų trajektorija yra tiesinė ir apibūdinama pradine y_{01} ir galine y_{gt} trajektorijos koordinatėmis.

Nesimetrinės lėtinimo ir kreipimo sistemos atveju, kuomet elektronų pluoštas yra arčiau elektrodo (toliau nuo ekrano), tuo kreipimas gaunasi stipresnis dėl didesnio elektrinio lauko stiprumo (dėl paviršinio elektrinio lauko pobūdžio), todėl pereinamosios charakteristikos kilimo trukmė gaunasi mažesnė. Kai elektronų pluoštas yra arčiau elektrodo, gaunami didesni pereinamosios charakteristikos fronto netolygumai. Kuomet elektronų pluoštas yra arčiau ekrano, tuo pereinamosios charakteristikos fronto pradinės ir galinės dalių statumas gaunasi mažesnis. Panašiai atrodo ir 2.18 paveiksle, *b*, pateiktos simetrinės sistemos pereinamosios charakteristikos. Šiuo atveju elektronų pluoštas yra tarp dviejų kreipimo elektrodų. Kuomet elektronų pluoštas yra arčiau elektrodo (viršutinio arba apatinio), tuo pereinamosios charakteristikos kilimo trukmė gaunama mažesnė, o fronto netolygumai didesni. Mažiausias pereinamosios charakteristikos fronto pradinės ir galinės dalių statumas ir didžiausia pereinamosios charakteristikos kilimo trukmė gaunami, kai elektronų pluoštas yra viduryje tarp elektrodų. Skirtingai nei

nesimetrinės sistemos atveju, esant tokioms pat kreipimo sąlygoms, simetrinėje sistemoje gaunami mažesni pereinamosios charakteristikos fronto netolygumai, nors kilimo trukmė šiek tiek didesnė. Todėl galime patvirtinti mintį, kad simetrinės sistemos atveju paviršinio elektrinio lauko pobūdžio įtaka mažesnė simetrinių sistemų atveju [6].

Elektronų pluoštas kreipiamas dėka tiriamojo signalo sužadintos elektromagnetinės bangos skersinės elektrinio lauko dedamosios. Kai naudojama pastovaus poslinkio įtampa, taip pat įtakojanti elektronų pluošto kreipimą, pradinė elektronų trajektorija yra parabolinė ir apibūdinama pradine y_{01} ir galine y_{gp} trajektorijos koordinatėmis.

Siekiant įvertinti netiesinius dažninius iškraipymus, analizuosime elektronų pluošto poslinkio ekrane vaizdus, kai į sistemos įėjimą paduodamas didelės amplitudės impulsas. 2.19 paveiksle

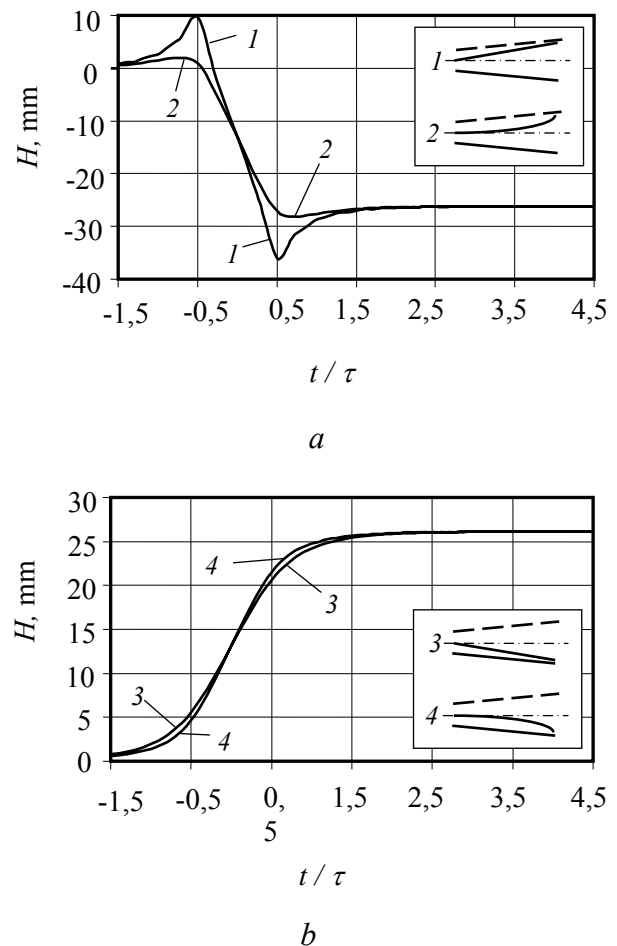


2.18 pav. Nesimetrinės (a) ir simetrinės (b) lėtinimo ir kreipimo sistemų normuotosios pereinamosios charakteristikos, kai $w_1 = 1$ mm, $w_2 = 3$ mm, $L = 1,5$ mm, $N = 10$, $U_0 = 1,5$ kV, $l_e = 0,15$ m, $u = 5$ V:

- 1 – $y_{01} = 0,1$ w₁, $y_{gt} = 0,1$ w₂;
- 2 – $y_{01} = 0,3$ w₁, $y_{gt} = 0,3$ w₂;
- 3 – $y_{01} = 0,5$ w₁, $y_{gt} = 0,5$ w₂;
- 4 – $y_{01} = 0,7$ w₁, $y_{gt} = 0,7$ w₂;
- 5 – $y_{01} = 0,9$ w₁, $y_{gt} = 0,9$ w₂

pavaizduoti elektronų pluošto poslinkio vaizdai, esant didelei kreipimo įtampa ir kai elektronų trajektorija yra tokia, kad elektronų pluoštas nesimetrinės lėtinimo ir kreipimo sistemos pradžioje yra viduryje tarp elektrodo ir ekrano, o sistemos gale yra prie elektrodo (2.19 pav., *a*) arba prie ekrano (2.19 pav., *b*). 1-a (2.19 pav., *a*) ir 3-a (2.19 pav., *b*) kreivės gautos kai pradinė elektronų trajektorija yra tiesinė ir neveikia pastovaus poslinkio įtampa, o 2-a (2.19 pav., *a*) ir 4-a (2.19 pav., *b*) kreivės gautos kai pradinė elektronų trajektorija yra parabolinė, t.y. kai veikia pastovaus poslinkio įtampa. Iš 2.19 paveikslo matome, kad, kai pradinė elektronų pluošto trajektorija yra parabolinė ir yra tokia, kad elektronų pluoštas sistemos gale yra prie elektrodo (2.19 pav., *a*, 2 kreivė), gaunamo elektronų pluošto poslinkio ekrane kilimo trukmė yra didesnė, o fronto netolygumai mažesni, nei tuo atveju kai pradinė elektronų trajektorija yra tiesinė (2.19 pav., *a*, 1 kreivė) ir elektronų pluoštas yra kreipiamas tokio pat signalo. Kai pradinė elektronų trajektorija yra parabolinė ir lėtinimo ir kreipimo sistemos gale yra šalia ekrano (2.19 pav., *b*, 4 kreivė), gaunamo poslinkio ekrane kilimo trukmė gaunama mažesnė, o fronto pradinės ir galinės dalių statusas didesnis, nei tuo atveju, kai elektronų trajektorija yra tiesinė (2.19 pav., *b*, 3 kreivė) ir elektronų pluoštas yra kreipiamas tokios pat amplitudės signalo. Iš gautų charakteristikų galime daryti išvadą, kad naudojant pastovaus poslinkio įtampą, galima sumažinti paviršinio elektrinio lauko pobūdžio įtaką lėtinimo ir kreipimo sistemos pereinamajai charakteristikai.

2.20 paveiksle pavaizduotos simetrinės lėtinimo ir kreipimo sistemos poslinkio ekrane vaizdai. Čia, kaip ir nesimetrinės sistemos atveju, poslinkio ekrane vaizdai gauti, kai elektronų pluoštas lėtinimo ir kreipimo sistemos pradžioje yra viduryje tarp elektrodų, o sistemos gale yra prie teigiamo elektrodo (2.20 pav., *a*, 1, 2 kreivės) arba prie neigiamo elektrodo (2.20 pav., *b*, 3, 4 kreivės). Iš 2.20 paveikslo galime pamatyti, kad ir simetrinės sistemos atveju,



2.19 pav. Nesimetrinės lėtinimo ir kreipimo sistemos poslinkio ekrane vaizdai, kai $w_1 = 1$ mm, $w_2 = 3$ mm, $y_{01} = 0,5 w_1$, $L = 1,5$ mm, $N = 10$, $U_0 = 1,5$ kV, $l_e = 0,15$ m:

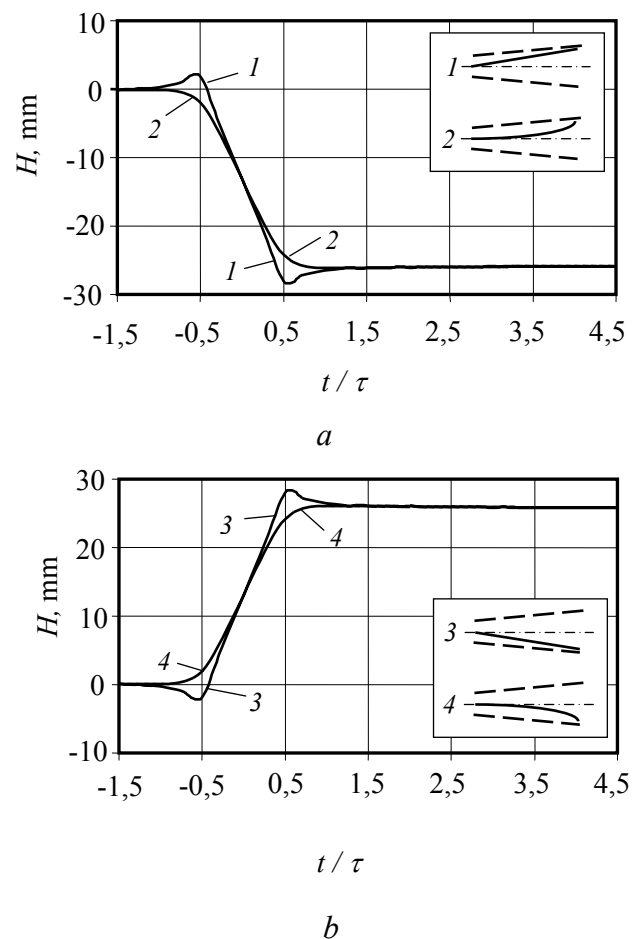
1 – $y_{gt} = 0,9 w_2$; 2 – $y_{gp} = 0,9 w_2$;

3 – $y_{gt} = 0,1 w_2$; 4 – $y_{gp} = 0,1 w_2$

naudojant pastovaus poslinkio įtampą, galima sumažinti paviršinio elektrinio lauko pobūdžio įtaką lėtinimo ir kreipimo sistemos pereinamajai charakteristikai. Šiuo atveju nėra skirtumo prie kurio elektrodo sistemos gale yra pradinės elektronų trajektorijos elektronų pluoštas, t.y. kai elektronų pluoštas sistemos gale yra šalia viršutinio elektrodo ir kreipiamas didelės amplitudės neigiamos įtampos, gauto poslinkio ekrane kilimo trukmė ir fronto statumas tokie pat kaip ir tuo atveju, kai elektronų pluoštas sistemos gale yra šalia apatinio elektrodo ir kreipiamas didelės amplitudės teigiamos įtampos.

2.21 paveiksle pateiktos dėl elektrinio lauko paviršinio efekto gaunamos elektrinio lauko skersinės dedamosios priklausomybės nuo skersinės koordinatės y , kai plotis tarp kreipimo elektrodų (arba ekrano ir elektrodo) skirtingas nesimetrinės (2.21 pav., *a*) ir simetrinės (2.21 pav., *b*) lėtinimo ir kreipimo sistemų atvejais aukštuosiuose dažniuose ($\theta = \pi$). Iš 2.21 paveikslų matome, kad kuo tarpas tarp kreipimo elektrodų (arba ekrano ir elektrodo) mažesnis, tuo gaunama mažesnė elektrinio lauko skersinės dedamosios priklausomybė nuo skersinės koordinatės. 2.21 paveiksle pateiktos kreivės patvirtina, kad simetrinės sistemos atveju skersinė elektrinio lauko dedamoji nuo koordinatės y priklauso mažiau nei nesimetrinės sistemos atveju [6].

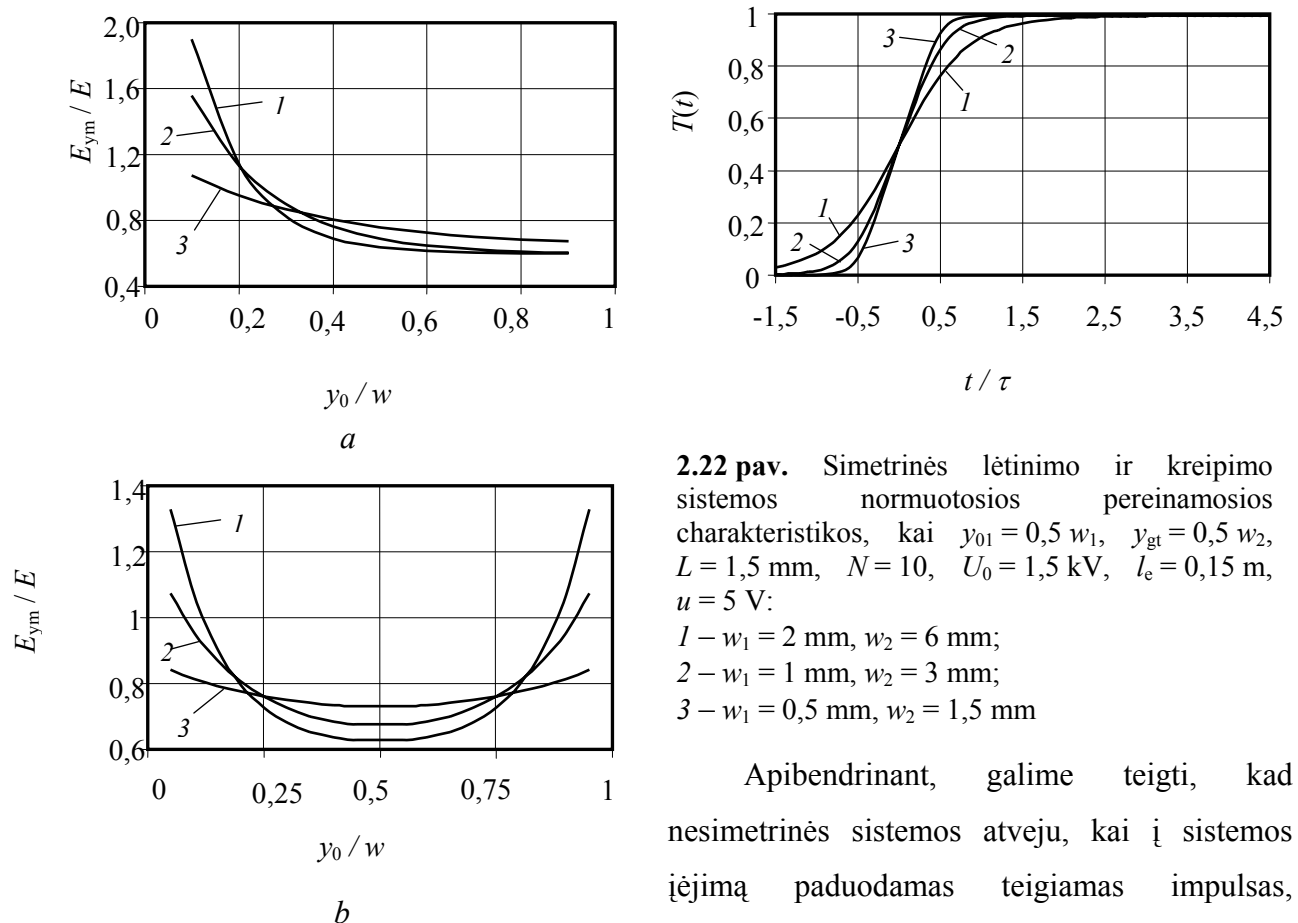
2.22 paveikslas iliustruoja, kokią įtaką simetrinės lėtinimo ir kreipimo sistemos pereinamosioms charakteristikoms turi tarpo tarp kreipimo elektrodų plotis. Iš 2.22 paveikslų pateiktų pereinamųjų charakteristikų matome, kad kuo mažesnis tarpas tarp kreipimo elektrodų, tuo gaunama mažesnė pereinamosios charakteristikos kilimo trukmė. Tai paaiškinama tuo, kad kuo tarpas tarp kreipimo elektrodų (arba ekrano ir elektrodo) mažesnis, tuo gaunama mažesnė elektrinio lauko skersinės dedamosios priklausomybė nuo skersinės koordinatės (2.21 pav.). Tuomet gaunamas didesnis pereinamosios charakteristikos fronto pradinės ir galinės dalių statumas.



2.20 pav. Simetrinės lėtinimo ir kreipimo sistemos poslinkio ekrane vaizdai, kai $w_1 = 1$ mm, $w_2 = 3$ mm, $y_{01} = 0,5 w_1$, $L = 1,5$ mm, $N = 10$, $U_0 = 1,5$ kV, $l_e = 0,15$ m:

1 – $y_{gt} = 0,9 w_2$; 2 – $y_{gp} = 0,9 w_2$;

3 – $y_{gt} = 0,1 w_2$; 4 – $y_{gp} = 0,1 w_2$



2.21 pav. Nesimetrinės (a) ir simetrinės (b) lėtinimo ir kreipimo sistemų elektrinio lauko skersinės dedamosios priklausomybės nuo skersinės koordinatės ir nuo atstumo tarp kreipimo elektrodų, kai $\theta = \pi$, $L = 1,5$ mm, $l = 0,7$ mm:

1 – $w = 3$; 2 – $w = 2$; 3 – $w = 1$

2.22 pav. Simetrinės lėtinimo ir kreipimo sistemos normuotosios pereinamosios charakteristikos, kai $y_{01} = 0,5 w_1$, $y_{gt} = 0,5 w_2$, $L = 1,5$ mm, $N = 10$, $U_0 = 1,5$ kV, $l_e = 0,15$ m, $u = 5$ V:

1 – $w_1 = 2$ mm, $w_2 = 6$ mm;

2 – $w_1 = 1$ mm, $w_2 = 3$ mm;

3 – $w_1 = 0,5$ mm, $w_2 = 1,5$ mm

Apibendrinant, galime teigti, kad nesimetrinės sistemos atveju, kai į sistemos įėjimą paduodamas teigiamas impulsas, elektronų pluoštas artėja prie lėtinimo elektrodo, kur kreipiančiojo elektrinio lauko stiprumas didesnis. Neigiamojo impulso atveju elektronų pluoštas kreipiamas priešinga kryptimi, kur elektrinio lauko stiprumas mažesnis. Dėl kreipiančiojo elektrinio lauko stiprumo

priklausomybės nuo koordinatės y kylant dažniui gaunami netiesiniai iškraipymai vamzdžio ekrane. Simetrinės sistemos atveju elektronų pluoštą kreipia nelyginė banga. Kaip jau buvo minėta, sužadinus nelyginę bangą, šios sistemos savybės nepasikeistų, jeigu simetrijos plokštumoje būtų sudaryta elektrinė sienelė – idealiai laidus ekranas. Tarpas tarp tokio ekrano ir lėtinimo elektrodo yra dvigubai mažesnis už tarpą tarp kreipimo elektrodų. Tokios sistemos atveju netiesiniai iškraipymai dėl paviršinio elektrinio lauko pobūdžio gaunami mažesni [1, 6, 178].

2.4 Išvados

1. Išvengus dispersijos, lėtinimo ir kreipimo sistemos banginės varžos kitimo, kintant dažniui, ir kreipiančiojo elektrinio lauko stiprumo kitimo, kintant dažniui, signalinio trakto pereinamosios charakteristikos kilimo trukmė sumažėtų maždaug 2 kartus, elektroninio vamzdžio pereinamosios

charakteristikos kilimo trukmė – apie 2...2,4 karto. Atitinkamai padidėtų ekvivalentinių pralaidumo juostų pločiai.

2. Santykiškai didžiausieji netiesiniai iškraipymai atsiranda nesimetrinėse bėgančiosios bangos kreipimo sistemose. Netiesinius virpesių formos iškraipymus ir elektronų pluošto išsifokusavimą galima sumažinti taikant lovelines ir simetrines bėgančiosios bangos lėtinimo ir kreipimo sistemas.

3 skyrius**Kvazisimetrinės konstrukcijos lėtinimo ir kreipimo sistemos modelis
ir savybių analizė**

Šiame skyriuje nagrinėsime kvazisimetrinės konstrukcijos lėtinimo ir kreipimo sistemą, sudarytą iš dviejų spiralinių elektrodų, kurioje vienos spiralės (skirtos kompensacinei įtampai) vijos užtrumpintos metalo sluoksniu, sudarytu ant keraminio spiralės laikiklio. Šiame skyriuje, siekdami atskleisti reiškinius, lemiančius kvazisimetrinės spiralinės lėtinimo ir kreipimo sistemos savybes, sudarysime paprasčiausią sistemos modelį ir nagrinėsime trumpai sujungtų vijų įtaką sistemos lėtinimo koeficientui, įėjimo varžai ir slopinimui.

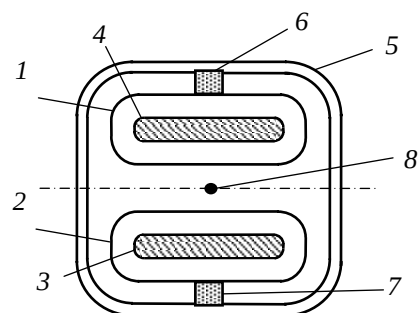
Šio skyriaus svarbiausi rezultatai paskelbti [199].

3.1 Kvazisimetrinės konstrukcijos lėtinimo ir kreipimo sistema ir jos modelis**3.1.1 Kvazisimetrinės konstrukcijos lėtinimo ir kreipimo sistemos modelis**

3.1 paveiksle pateiktas supaprastintas kvazisimetrinės spiralinės sistemos pjūvio vaizdas.

Sistema sudaryta iš dviejų spiralinių, vidinių ir išorinio ekranų ir keraminių laikiklių. Ant laikiklio 7 sudarytas metalo sluoksnis. Jis trumpai sujungia spiralės 2, kuri panaudota kaip kompensacinis elektrodas, vijas.

Kaip ir [4, 6, 15, 44] kvazisimetrinės sistemos analizei taikysime daugialaidžių linijų metodą. Paprasčiausias kvazisimetrinės spiralinės sistemos modelis pavaizduotas



3.1 pav. Kvazisimetrinės spiralinės sistemos pjūvio vaizdas:

1, 2 – spiralinių laidininkai, 3, 4 – vidiniai ekranai, 5 – išorinis ekranas, 6, 7 – spiralinių laikikliai; 8 – elektronų pluoštas

3.2 paveiksle. Jį sudaro dvieilės vienpakopės daugialaidės linijos atkarpa ir ekranai.

Daugialaidės linijos laidininkų potencialai ir srovės išreiškiami lygtimis [6]:

$$\underline{U}_{sn}(x) = [(\underline{A}_1 \sin kx + \underline{A}_2 \cos kx) + (-1)^s (\underline{A}_3 \sin kx + \underline{A}_4 \cos kx)] e^{-jn\theta}, \quad (3.1)$$

$$\underline{I}_{sn}(x) = j[Y(0, \theta)(\underline{A}_1 \cos kx - \underline{A}_2 \sin kx) + (-1)^s Y(\pi, \theta)(\underline{A}_3 \cos kx - \underline{A}_4 \sin kx)] e^{-jn\theta}; \quad (3.2)$$

čia s – daugialaidės linijos laidininkų eilės numeris; n – laidininko numeris, $\underline{A}$ – amplitudinis koeficientas, k – bangos skaičius, θ – gretimų daugialaidės linijos laidininkų įtampų ar srovių fazių skirtumas; $Y(0, \theta)$ ir $Y(\pi, \theta)$ – banginiai laidumai, kai gretimų daugialaidės linijos laidininkų įtampų ar srovių fazės skirtumas θ lygus 0 ir π .

Kai neįvertinama trumpai sujungtos vijos varža ($R = 0$), daugialaidės linijos atkarpa modeliuoja kvazisimetrinę sistemą, jeigu tenkinamos sąlygos:

$$\underline{U}_{20}(h) = \underline{U}_{21}(-h), \quad (3.3)$$

$$\underline{I}_{20}(h) = \underline{I}_{21}(-h), \quad (3.4)$$

$$\underline{U}_{10}(-h) = 0, \quad (3.5)$$

$$\underline{U}_{10}(h) = 0. \quad (3.6)$$

Tuomet įrašę į kraštinių sąlygų lygtis (3.3)-(3.6) įtampų ir srovių išraiškas (3.1), (3.2), sprenddami gautą lygčių sistemą, gauname du sprendinius:

$$kh = m\pi \quad (3.7)$$

ir

$$kh = \theta/2. \quad (3.8)$$

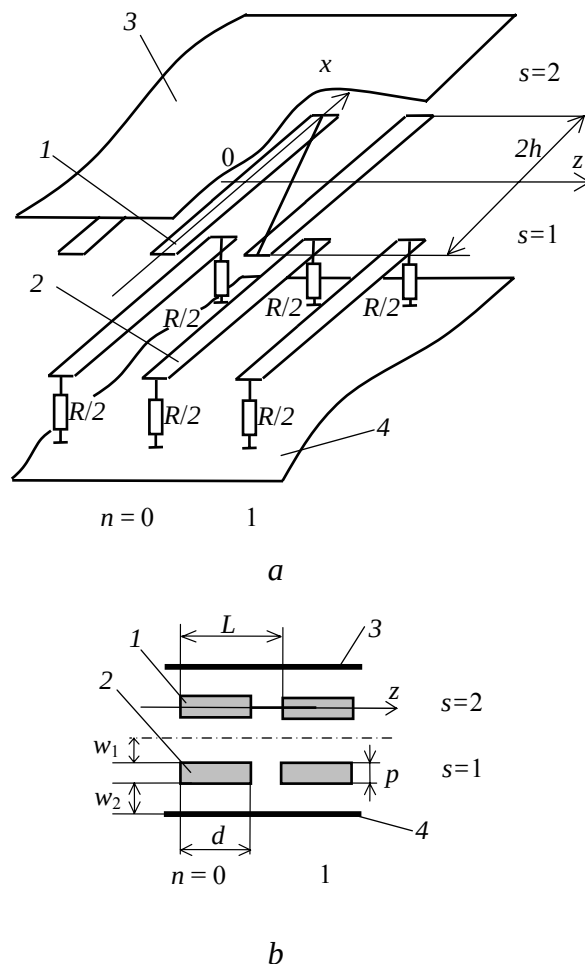
Remdamiesi (3.8), galime rasti lėtinimo koeficientą ir dažnį:

$$k_L = \theta/kL = 2h/L, \quad (3.9)$$

$$f = kc_0/2\pi = \frac{\theta}{4\pi h}; \quad (3.10)$$

čia L – spiralės vijų ir daugialaidės linijos laidininkų žingsnis, c_0 – šviesos greitis.

Pagal (3.9) ir (3.10), kai neatsižvelgiama į vijų varžą, nagrinėjamos kvazisimetrinės spiralinės sistemos lėtinimo koeficientas pastovus.



3.2 pav. Kvazisimetrinės sistemos modelis (a) ir daugialaidės linijos pjūvis (b):

1 – daugialaidės linijos laidininkas, modeliuojantis spiralės viją; 2 – daugialaidės linijos laidininkas, modeliuojantis užtrumpintąją viją; 3, 4 – ekranai

(3.7) formulei galime suteikti tokį pavidalą:

$$2h = m\lambda / 2 ; \quad (3.11)$$

čia m – sveikasis skaičius.

Remiantis (3.7) ir (3.9), trumpai sujungtų vijų įtaka sistemos savybėms gali būti didžiausia, kai $f = 0$ ir esant rezonansiniams dažniams, kai vijos ilgyje telpa sveikasis pusbangių skaičius.

Sistemos įėjimo varžą aprašo formulė

$$\underline{Z}_{IN}(x) = \frac{\underline{U}_{20}(x)}{\underline{I}_{20}(x)} . \quad (3.12)$$

Bendru atveju ji priklauso nuo koordinatės x . Kai $x = 0$:

$$\underline{Z}_{IN}(0) = \frac{1}{j(Y(0, \theta) + Y(\pi, \theta))} . \quad (3.13)$$

Atsižvelgiant į trumpai sujungtų vijų varžas ($R \neq 0$), turi būti tenkinamos sąlygos:

$$\underline{U}_{20}(h) = \underline{U}_{21}(-h) , \quad (3.14)$$

$$\underline{I}_{20}(h) = \underline{I}_{21}(-h) , \quad (3.15)$$

$$\underline{U}_{10}(-h) = -\underline{I}_{10}(-h)R/2 , \quad (3.16)$$

$$\underline{U}_{10}(h) = \underline{I}_{10}(h)R/2 . \quad (3.17)$$

Įrašę į (3.14)–(3.17) lygtis įtampų ir srovių išraiškas ir pašalinę koeficientus $\underline{A}_3$ ir $\underline{A}_4$ gauname lygčių sistemą:

$$\begin{cases} \underline{A}_1 \underline{D}_1 + \underline{A}_2 \underline{D}_2 = 0, \\ \underline{A}_1 \underline{D}_3 - \underline{A}_2 \underline{D}_4 = 0; \end{cases} \quad (3.18)$$

čia

$$\underline{D}_1 = (1 + \underline{S}_1) \sin kh (1 + e^{-j\theta}) , \quad (3.19)$$

$$\underline{D}_2 = (1 + \underline{S}_2) \cos kh (1 - e^{-j\theta}) , \quad (3.20)$$

$$\underline{D}_3 = (Y(0, \theta) + Y(\pi, \theta)\underline{S}_1) \cos kh (1 - e^{-j\theta}) , \quad (3.21)$$

$$\underline{D}_4 = (Y(0, \theta) + Y(\pi, \theta)\underline{S}_2) \sin kh (1 + e^{-j\theta}) , \quad (3.22)$$

$$\underline{S}_1 = \frac{\sin kh - j0,5RY(0, \theta)\cos kh}{\sin kh - j0,5RY(\pi, \theta)\cos kh} ,$$

$$\underline{S}_2 = \frac{\cos kh + j0,5RY(0, \theta)\sin kh}{\cos kh + j0,5RY(\pi, \theta)\sin kh} .$$

Spręsdami šią lygčių sistemą, gauname sistemos dispersinę lygtį, kuriai galima suteikti tokį pavidalą:

$$\tan^2 \frac{\theta}{2} = \frac{2 \sin kh - j0,5R(Y(0, \theta) + Y(\pi, \theta)) \cos kh}{2 \cos kh + j0,5R(Y(0, \theta) + Y(\pi, \theta)) \sin kh} \times \frac{(Y(0, \theta) + Y(\pi, \theta)) \cos kh + jRY(0, \theta)Y(\pi, \theta) \sin kh}{(Y(0, \theta) + Y(\pi, \theta)) \sin kh - jRY(0, \theta)Y(\pi, \theta) \cos kh} \tan^2 kh \quad (3.23)$$

Pareikalavę, kad (3.18) lygčių sistemos determinantas būtų lygus nuliui, arba spęsdami (3.23) dispersinę lygtį, galime apskaičiuoti kampo θ realiosios (θ_r) ir menamosios (θ_m) dedamųjų vertes, atitinkančias duotą arba pasirinktą bangos skaičiaus k vertę. Tada pagal θ_r galime apskaičiuoti lėtinimo koeficientą k_L , o pagal θ_m – koeficientą α_1 , apibūdinantį slopinimą:

$$k_L = \theta_r / kL, \quad (3.24)$$

$$\alpha_1 = |\theta_m|. \quad (3.25)$$

Žinodami koeficientą α_1 ir atsižvelgdami į (3.1) ir (3.2) galime nustatyti, kaip keičiasi sistemos, sudarytos iš N vijų, įtampos perdavimo koeficiento modulis dėl nuostolių trumpai sujungtose vijose:

$$K = \exp(-N\alpha_1). \quad (3.26)$$

Žinodami koeficientų $\underline{A}_1$ ir $\underline{A}_2$ sąryšį ir taikydami (3.12) formulę galime rasti sistemos įėjimo varžą. Kai $x = 0$, gauname:

$$\underline{Z}_{IN}(0) = \frac{2 \sin kh - j0,5R(Y(0, \theta) + Y(\pi, \theta)) \cos kh}{(Y(0, \theta) + Y(\pi, \theta)) \sin kh - jRY(0, \theta)Y(\pi, \theta) \cos kh} \cot \frac{\theta}{2} \tan kh. \quad (3.27)$$

3.1.2 Alternatyvus slopinimo įvertinimo būdas

Koeficientą α_1 taip pat galima rasti apskaičiavus sistemos periode (trumpai sujungtoje vijoje) prarandamą galią P_1 ir sistemoje sklindančią galią P :

$$e^{-2\alpha_1} = \frac{P - P_1}{P}. \quad (3.28)$$

Pagal (3.28), kai $P_1 \ll P$:

$$\alpha_1 \cong 0,5 \frac{P_1}{P}. \quad (3.29)$$

Trumpai sujungtoje vijoje prarandamą galią galime rasti pagal formulę

$$P_1 = 0,5 \left(\frac{|I_{10}(h)|^2 R}{2} + \frac{|I_{10}(-h)|^2 R}{2} \right) = \frac{R (|I_{10}(h)|^2 + |I_{10}(-h)|^2)}{4}. \quad (3.30)$$

Sistemoje sklindanti galia gali būti įvertinta formule

$$P = \frac{|U_{20}(0)|^2}{2Z_{IN}(0)}. \quad (3.31)$$

Irašę (3.30) ir (3.31) lygtis į (3.29), gauname:

$$\alpha_1 = \frac{R Z_{IN}(0)}{4} \frac{(|I_{10}(h)|^2 + |I_{10}(-h)|^2)}{|U_{20}(0)|^2}. \quad (3.32)$$

3.2 Kvazisimetrinės konstrukcijos lėtinimo ir kreipimo sistemos analizė

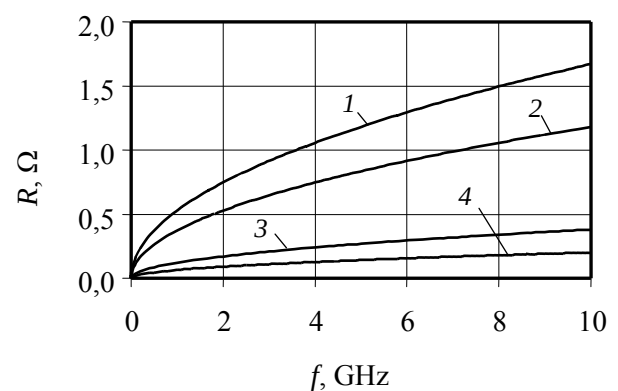
Kaip minėjome anksčiau, trumpai sujungtų vijų įtaka turėtų būti didžiausia žemųjų dažnių srityje ir kai dažnis toks, kad trumpai sujungtos vijos ilgis yra pusės bangos ilgio kartotinis. Dažnis, atitinkantis žemiausią vijos rezonansinį dažnį, būtų už elektroninio vamzdžio praleidžiamųjų dažnių juostos ribų [6]. Be to, remiamės paprasčiausiu kvazisimetrinės sistemos modeliu (3.2 pav.), kuriame trumpai sujungtų vijų paskirstytosios varžos modeliuojamos sutelktosiomis varžomis. Atsižvelgdami į šias aplinkybes, toliau daugiausia dėmesio skirsime kvazisimetrinės sistemos savybėms žemųjų dažnių srityje.

Trumpai sujungtos vijos varža priklauso nuo dažnio. Atsižvelgiant į paviršinį efektą apskaičiuotos vijos varžos priklausomybės nuo dažnio pateiktos 3.3 paveiksle. Skaičiuojant priimta, kad paviršinis efektas pradeda reikštis, kai srovės įsiskverbimo gylis tampa mažesnis už pusę vijos laidininko storio.

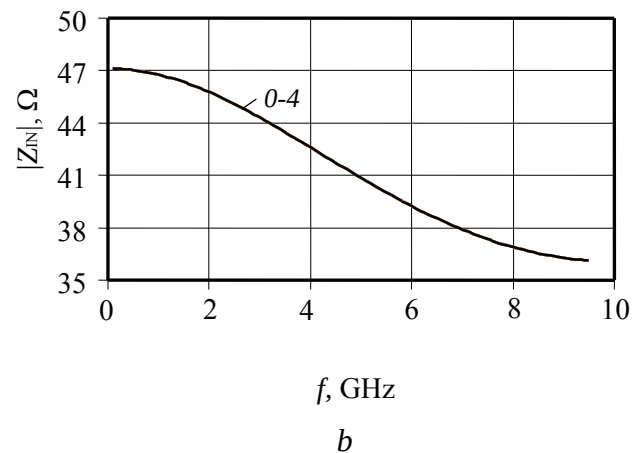
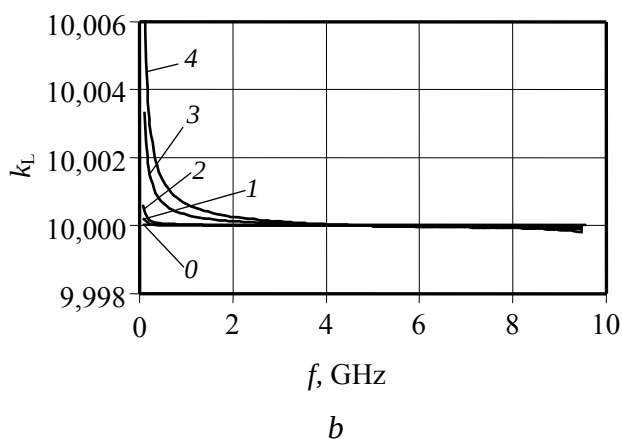
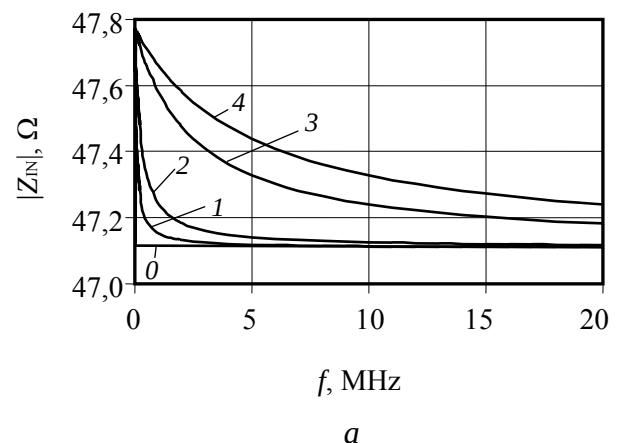
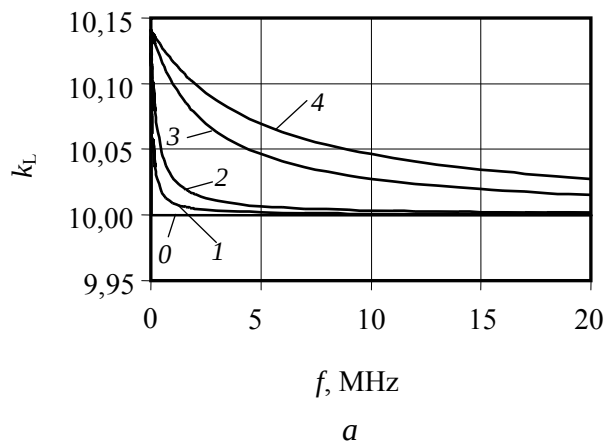
3.4 paveiksle, a , ir 3.5 paveiksle, a , pateiktos lėtinimo koeficiento k_L ir įėjimo varžos modulio $|Z_{IN}(0)|$ priklausomybės nuo dažnio ir nuo trumpai sujungtos vijos medžiagos žemųjų dažnių ruože, 3.4 paveiksle, b , ir 3.5 paveiksle, b , – platesniame dažnių diapazone.

Iš 3.4 ir 3.5 paveikslų matyti, kad tuo atveju, kai trumpai sujungtų vijų medžiaga idealiai laidė ($R = 0$), lėtinimo koeficientas pastovus plačiame dažnių diapazone ir lygus konstrukciniam lėtinimo koeficientui $k_{Lk} = 2h/L$, o sistemos įėjimo varža žemųjų dažnių srityje pastovi. Didėjant dažniui, įėjimo varža mažėja pagal spiralinėms sistemoms būdingą dėsnį.

Kaip ir buvo tikėtasi, gauta, kad trumpai sujungtų vijų varžų įtaka didėja mažėjant



3.3 pav. Vijos varžos priklausomybės nuo dažnio ir medžiagos (1 – sidabras, 2 – molibdenas, 3 – konstantanas, 4 – nichromas), kai $p = 0,2$ mm, $d = 1$ mm, $h = 7,5$ mm



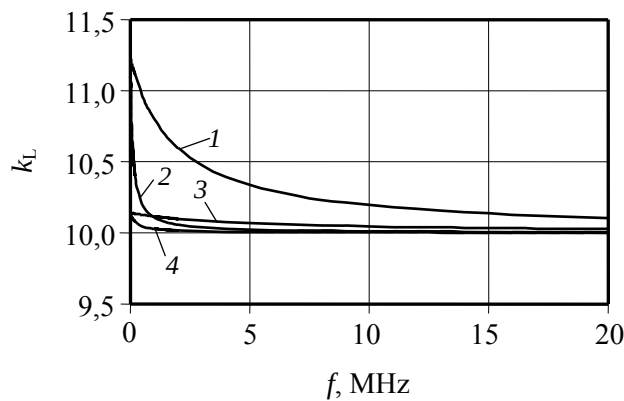
3.4 pav. Kvazisimetrinės sistemos lėtinimo koeficiento priklausomybės nuo dažnio žemųjų dažnių ruože (a) ir platesniame dažnių diapazone (b), kai $L = 1,5$ mm, $d = 1$ mm, $p = 0,2$ mm, $h = 7,5$ mm, $w_1 = 0,5$ mm, $w_2 = 0,2$ mm ir skirtingos trumpai sujungtų vijų medžiagos: 0 – idealiai laidų medžiaga ($R = 0$); 1 – sidabras; 2 – molibdenas; 3 – konstantanas; 4 – nichromas

3.5 pav. Kvazisimetrinės sistemos įėjimo varžos priklausomybės nuo dažnio žemųjų dažnių ruože (a) ir platesniame dažnių diapazone (b), kai $L = 1,5$ mm, $d = 1$ mm, $p = 0,2$ mm, $h = 7,5$ mm, $w_1 = 0,5$ mm, $w_2 = 0,2$ mm ir skirtingos trumpai sujungtų vijų medžiagos: 0 – idealiai laidų medžiaga ($R = 0$); 1 – sidabras; 2 – molibdenas; 3 – konstantanas; 4 – nichromas

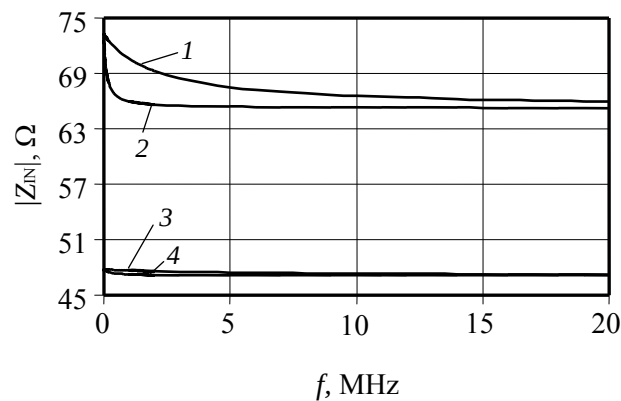
dažniui. Kuo didesnė vijos varža, tuo didesnis lėtinimo koeficientas ir įėjimo varža žemųjų dažnių srityje, bei platesnis dažnių ruožas, kuriame pasireiškia trumpai sujungtų vijų įtaka.

Aukštėjant dažniui, trumpai sujungtų vijų įtaka kvazisimetrinės sistemos lėtinimo koeficientui ir įėjimo varžai mažėja. Tai galima paaiškinti tuo, kad, aukštėjant dažniui, elektromagnetinis laukas telkiasi prie lėtinimo elektrodo ir kvazisimetrinėje sistemoje silpnėja elektromagnetinis ryšys tarp spiralės ir trumpai sujungtų vijų.

Pastarąją mintį patvirtina 3.6 paveikslą charakteristikos, apskaičiuotos, kai nuotolis $2w_1$ tarp kvazisimetrinės sistemos spiralės ir trumpai sujungtų vijų lygus 0,5 mm ir 1 mm. Akivaizdu, kad, padidinus nuotolį tarp spiralės ir trumpai sujungtų vijų, jų įtaka kvazisimetrinės sistemos lėtinimo koeficiento ir įėjimo varžos dažninėms charakteristikoms labai sumažėja.



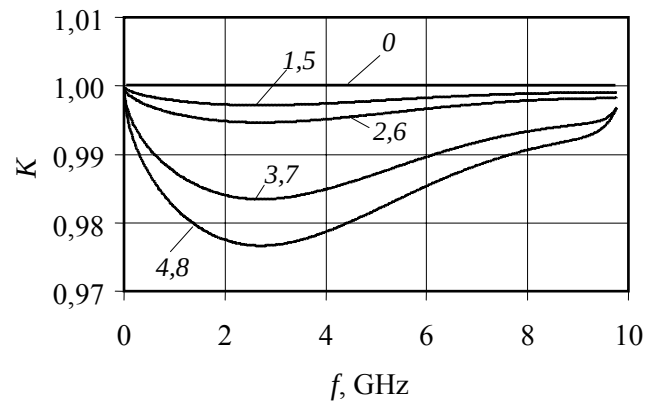
a



b

3.6 pav. Kvazisimetrinės sistemos lėtinimo koeficiento (a) ir įėjimo varžos (b) priklausomybės nuo dažnio žemųjų dažnių ruože, kai $L = 1,5$ mm, $d = 1$ mm, $p = 0,2$ mm, $h = 7,5$ mm:

1, 2 – $w_1 = 0,25$ mm, $w_2 = 0,45$ mm; 3, 4 – $w_1 = 0,5$ mm, $w_2 = 0,2$ mm; 1, 3 – nichromas; 2, 4 – molibdenas



3.7 pav. Kvazisimetrinės lėtinimo sistemos perdavimo koeficiento modulio priklausomybės nuo dažnio, kai $N = 60$, $L = 1,5$ mm, $d = 1$ mm, $p = 0,2$ mm, $h = 7,5$ mm, $w_1 = 0,5$ mm, $w_2 = 0,2$ mm:

0 – neįvertinus trumpai sujungtos vijos varžos ($R = 0$); 1, 5 – sidabras; 2, 6 – molibdenas; 3, 7 – konstantanas; 4, 8 – nichromas

3.7 paveiksle pavaizduotos perdavimo koeficiento modulio, gauto skaičiuojant koeficientą α_1 dviem aptartais būdais, priklausomybės nuo dažnio. 3.7 paveikslo 1 – 4 kreivės apskaičiuotos pagal įtampų ar srovių fazių skirtumo tarp gretimų vijų menamosios dalies modulį, 5–8 kreivės – pagal trumpai sujungtoje vijoje prarandamos galios ir sistemoje sklindančios galios santykį. Iš 3.7 paveikslo kreivių matyti, kad taikant abu

būdus gaunami tapatūs rezultatai.

Pagal 3.7 paveikslą dėl nuostolių trumpai sujungtose vijoje sistemos amplitudės dažninė charakteristika gaunama netolygi. Kuo didesnės trumpai sujungtų vijų varžos, tuo jų įtaka didesnė – pasireiškia didesnis slopinimas kvazisimetrinėje sistemoje.

Atsižvelgiant į bėgančiosios bangos elektroninių vamzdžių charakteristikų priklausomybes nuo elektrodinaminių lėtinimo ir kreipimo sistemų charakteristikų [4, 6, 15, 44], verta pažymėti, kad didžiausios įtakos elektroninio vamzdžio su kvazisimetrine lėtinimo ir kreipimo sistema charakteristikoms gali turėti sistemos banginės varžos kitimas žemųjų dažnių srityje ir slopinimas dėl įneštinių nuostolių, pasireiškiančių trumpai sujungtose vijoje.

Atsižvelgdami tik į paviršinį efektą gavome, kad kvazisimetrinės sistemos įėjimo varžos pokytis žemųjų dažnių srityje gali siekti 1,5 % (3.5 pav., a). Slopinimas lėtinimo ir kreipimo

sistemoje dėl įneštinės varžos nėra didelis (3.7 pav.). Lėtinimo ir kreipimo sistemos amplitudės dažninės charakteristikos netolygumas vien tik dėl trumpai sujungtų vijų varžų, apskaičiuotų atsižvelgiant į paviršinį efektą, gali būti kelių decibelo dalių eilės.

3.3 Išvados

1. Dėl trumpai sujungtų vijų kinta kvazisimetrinės spiralinės lėtinimo ir kreipimo sistemos lėtinimo koeficientas ir sistemos įėjimo varža žemųjų dažnių srityje. Didėjant dažniui trumpai sujungtų vijų įtaka mažėja, nes silpnėja elektromagnetinis ryšys tarp spiralės ir trumpai sujungtų vijų.
2. Nuostoliai trumpai sujungtose vijose didina signalo slopinimą kvazisimetrinėje sistemoje. Trumpai sujungtų vijų įtaka slopinimui tuo didesnė, kuo didesnės vijų varžos ir kuo stipresnis elektromagnetinis ryšys tarp spiralės ir trumpai sujungtų vijų.
3. Spiralės su trumpai sujungtomis vijomis įtaka kvazisimetrinės sistemos savybėms nėra didelė, tačiau gali atsiliepti bėgančiosios bangos elektroninio vamzdžio atestavimo rezultatams.

4 skyrius

Dvipradės spiralinės lėtinimo ir kreipimo sistemos modelių sudarymas ir savybių analizė

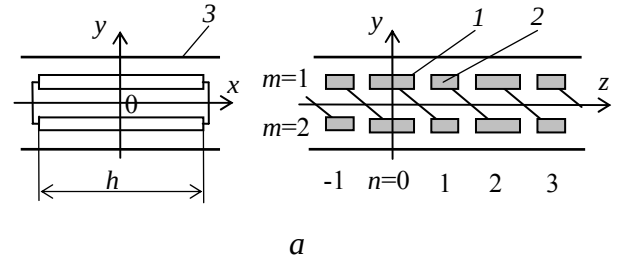
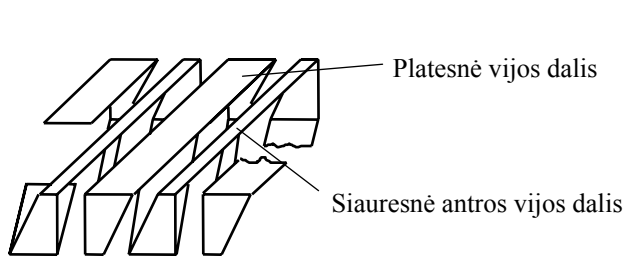
Šiame skyriuje nagrinėsime patente [129] pasiūlytą spiralinės lėtinimo ir kreipimo sistemos variantą. Kreipimo sistema sudaryta iš dviejų įsuktų viena į kitą bendraašių spiralių ir gali būti vadinama dviprade spiraline kreipimo sistema. Tokios konstrukcijos spiralinė sistema buvo tirta *Microwave Office* programiniu paketu [30, 143, 144]. Tačiau naudojant automatizuoto projektavimo paketą *Microwave Office* skaičiavimai trunka labai ilgai, atskleidžiama tik bendra visų veiksmų įtaka lėtinimo ir kreipimo sistemų savybėms. Atskirų veiksmų, svarbių lėtinimo ir kreipimo sistemų savybėms atskleisti, analizė komplikuoja. Kadangi [30, 143, 144] teigiama, kad inine sistemoje silpnesnė išilginė elektrinio lauko dedamoji ir pavyksta geriau sufokusuoti elektronų pluoštą, o elektrinio lauko struktūra tokiose sistemose dar nepakankamai tirta, tirsime elektrinio lauko pasiskirstymą dvipradėje lėtinimo ir kreipimo sistemoje ir palyginsime jį su elektriniu lauku kitose spiralinėse lėtinimo ir kreipimo sistemose. Taip pat, sudarę modelius, daugialaidžių linijų metodu tirsime panašios konstrukcijos, tik su vidiniu ekranu, dvipradę spiralinę lėtinimo ir kreipimo sistemą.

Šio skyriaus svarbiausi rezultatai paskelbti [183-186, 193].

4.1 Dvipradė spiralinės lėtinimo ir kreipimo sistema, jos modelis ir savybių analizė

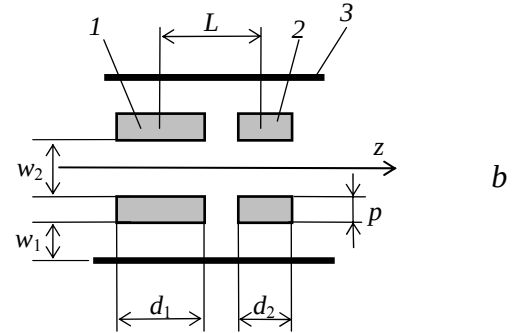
4.1.1 Dvipradės spiralinės lėtinimo ir kreipimo sistemos modelis

Dvipradės lėtinimo ir kreipimo sistemos vaizdas pateiktas 4.1 paveiksle. Ji sudaryta iš platesnės ir siauresnės bendraašių spiralių dalių ir išorinio ekrano. Dvipradės lėtinimo ir kreipimo sistemos analizei taikysime daugialaidžių linijų metodą [6, 179]. Taikant šį metodą, sudarysime dvipradės spiralinės lėtinimo ir kreipimo sistemos modelį ir ištirsime jos dažnines savybes. Modeliui panaudota dvieilės dvipakopės daugialaidės linijos atkarpa (4.2 pav.). Ji sudaryta iš dviejų



4.1 pav. Dvipradės spiralinės lėtinimo ir kreipimo sistemos, sudarytos iš vienos į kitą įsuktų bendraašių spiralinių fragmentas

daugialaidės linijos laidininkų eilių ir dviejų laidininkų periode. 4.2 paveiksle m – daugialaidės linijos laidininkų eilės numeris, n – laidininko eilės numeris eilėje, h atitinka pusę spiralės vijos ilgio. Daugialaidės linijos laidininkų galai sujungti taip, kad susidaro bendraašės spiralės. Linijos eilių laidininkų potencialai modelyje – priešingi. Pagal [6, 26], daugialaidės linijos laidininkų potencialai ir srovės išreiškiami lygtimis:



4.2 pav. Dvipradės spiralinės sistemos modelis (a) ir modelio daugialaidės linijos periodas (b): 1, 2 – linijos laidininkai; 3 – ekranas

$$\underline{U}_{mn}(x) = [\underline{A}_{U1} + (-1)^{m-1} \underline{A}_{U2} + (-1)^n \underline{A}_{U3} + (-1)^{m+n-1} \underline{A}_{U4}] e^{-jn\theta}, \quad (4.1)$$

$$\underline{I}_{mn}(x) = j \left[Y_n(0, \theta) \underline{A}_{I1} + (-1)^{m-1} Y_n(\pi, \theta) \underline{A}_{I2} + \right. \\ \left. + (-1)^n Y_n(0, \pi + \theta) \underline{A}_{I3} + (-1)^{m+n-1} Y_n(\pi, \pi + \theta) \underline{A}_{I4} \right] e^{-jn\theta}; \quad (4.2)$$

čia m – daugialaidės linijos eilės numeris; n – laidininko numeris eilėje; θ – įtampos arba srovės fazės skirtumas tarp gretimų eilės laidininkų; $Y_n(0, \theta)$, $Y_n(\pi, \theta)$, $Y_n(0, \pi + \theta)$, $Y_n(\pi, \pi + \theta)$ – daugialaidės linijos banginiai laidumai [26]; $\underline{A}_{Ui}$ ir $\underline{A}_{Ii}$ koeficientai, kurie išreiškiami lygtimis:

$$\underline{A}_{Ui} = \underline{A}_{i1} \sin kx + \underline{A}_{i2} \cos kx, \quad (4.3)$$

$$\underline{A}_{Ii} = \underline{A}_{i1} \cos kx - \underline{A}_{i2} \sin kx; \quad (4.4)$$

čia $k = \omega / c_0$ – bangos skaičius; ω – kampinis dažnis; c_0 – šviesos greitis vakuume, x – koordinatė. Kadangi daugialaidė linija sudaryta iš dviejų laidininkų periode, laidininkų su lyginiu numeriu n (platesni laidininkai) banginiai laidumai yra vienodi ir gali būti pažymėti Y_1 , o laidininkų su nelyginiu numeriu n (siauresni laidininkai) banginiai laidumai – Y_2 .

Kai spiralinių potencialai yra priešingi, turi būti tenkinamos tokios simetrijos sąlygos:

$$\underline{U}_{10}(0) = -\underline{U}_{20}(0), \quad (4.5)$$

$$\underline{I}_{10}(0) = I_{20}(0), \quad (4.6)$$

$$\underline{U}_{11}(0) = -\underline{U}_{21}(0), \quad (4.7)$$

$$\underline{I}_{11}(0) = I_{21}(0). \quad (4.8)$$

Daugialaidės linijos atkarpa modeliuoja dvipradę spiralinę sistemą, jeigu tenkinamos tokios kraštinės sąlygos:

$$\underline{U}_{10}(h/2) = \underline{U}_{21}(h/2), \quad (4.9)$$

$$\underline{I}_{10}(h/2) = -I_{21}(h/2), \quad (4.10)$$

$$\underline{U}_{20}(h/2) = \underline{U}_{1(-1)}(0), \quad (4.11)$$

$$\underline{I}_{20}(h/2) = -I_{1(-1)}(h/2). \quad (4.12)$$

Išrašę (4.1), (4.2) įtampų ir srovių išraiškas į simetrijos ir kraštinių sąlygų formules (4.5)–(4.12) gauname algebrinių lygčių sistemą. Pašalinę koeficientus $\underline{A}_{i1}$ ir $\underline{A}_{i2}$, gauname dispersinę lygtį:

$$\begin{aligned} & \frac{Y_2(0, \pi + \theta) \sin \theta - [Y_1(\pi, \pi + \theta) + Y_2(\pi, \pi + \theta) \cos \theta] \tan^2(kh/2) \cot(\theta/2)}{Y_2(0, \theta) \sin \theta - [Y_1(\pi, \theta) - Y_2(\pi, \theta) \cos \theta] \tan^2(kh/2) \tan(\theta/2)} = \\ & = - \frac{Y_1(0, \pi + \theta) - Y_2(0, \pi + \theta) \cos \theta - 2Y_2(\pi, \pi + \theta) \tan^2(kh/2) \cos(\theta/2)}{Y_1(0, \theta) + Y_2(0, \theta) \cos \theta - 2Y_2(\pi, \theta) \tan^2(kh/2) \sin^2(\theta/2)} \end{aligned} \quad (4.13)$$

Spręsdami dispersinę lygtį, galime rasti, kaip bangos skaičius k priklauso nuo kampo θ . Žinodami θ ir k reikšmes galime rasti sistemos lėtinimo koeficiento k_L ir dažnio f reikšmes:

$$k_L = \theta / kL, \quad (4.14)$$

$$f = kc_0 / 2\pi; \quad (4.15)$$

čia L – daugialaidės linijos laidininkų žingsnis.

Bendru atveju įėjimo varža priklauso nuo koordinatės x . Kai $x = 0$, įėjimo varža priklauso nuo laidininko numerio. Kai $n = 0$, ji gali būti apskaičiuojama:

$$Z_0 = \frac{U_{10}(0) - U_{20}(0)}{I_{10}(0) + I_{20}(0)} = \frac{\tan(kh/2) \cot(\theta/2) - S \tan(kh/2) \tan(\theta/2)}{Y_1(0, \pi + \theta) + SY_1(0, \theta)}, \quad (4.16)$$

ir kai $n = 1$:

$$Z_1 = \frac{U_{11}(0) - U_{21}(0)}{I_{11}(0) + I_{21}(0)} = \frac{\tan(kh/2) \cot(\theta/2) + S \tan(kh/2) \tan(\theta/2)}{Y_2(0, \pi + \theta) - SY_2(0, \theta)}. \quad (4.17)$$

Dydis S formulėse (4.16) ir (4.17) apibrėžiamas:

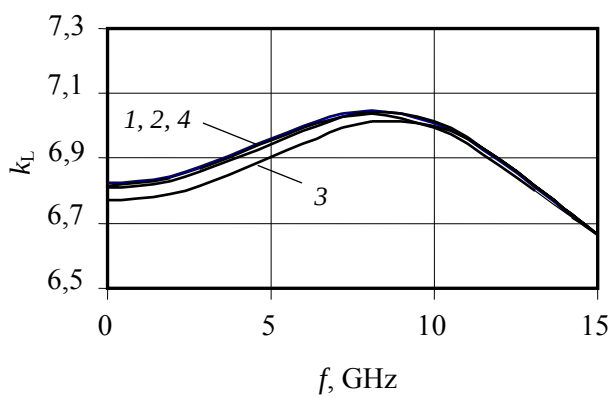
$$S = \frac{Y_2(0, \pi + \theta) \cos \theta + 2Y_2(\pi, \pi + \theta) \tan^2(kh/2) \cos^2(\theta/2) - Y_1(0, \theta)}{Y_2(0, \theta) \cos \theta - 2Y_2(\pi, \theta) \tan^2(kh/2) \sin^2(\theta/2) + Y_1(0, \theta)}. \quad (4.18)$$

Banginiai laidumai, reikalingi lėtinimo koeficiento ir įėjimo varžos skaičiavimui, gali būti rasti taikant skaitinius baigtinių skirtumų arba baigtinių elementų metodus.

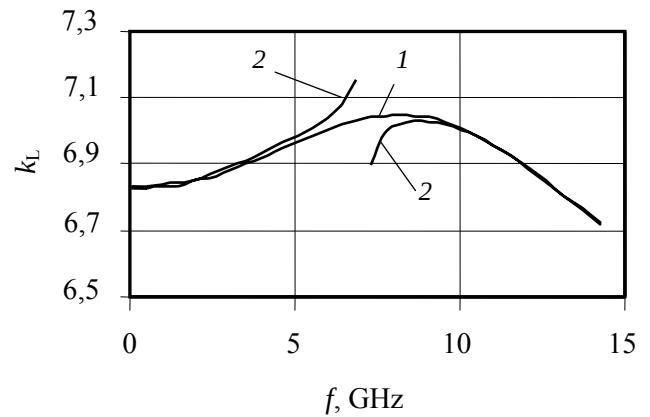
4.1.2 Dvipradės spiralinės lėtinimo ir kreipimo sistemos savybės

4.3 paveiksle pateiktos dvipradės lėtinimo ir kreipimo sistemos, kai abiejų spiralių pločiai vienodi, lėtinimo koeficiento ir įėjimo varžos priklausomybės nuo dažnio. Iš 4.3 paveikslo matome, kad lėtinimo koeficientas priklauso nuo dažnio. Mažinant laidininkų storį ir didinant tarpą tarp jų, galime sumažinti elektromagnetinės bangos dispersiją sistemoje. Mažinant laidininkų storį ir didinant tarpą tarp jų, didėja įėjimo varža (4.3 pav., b).

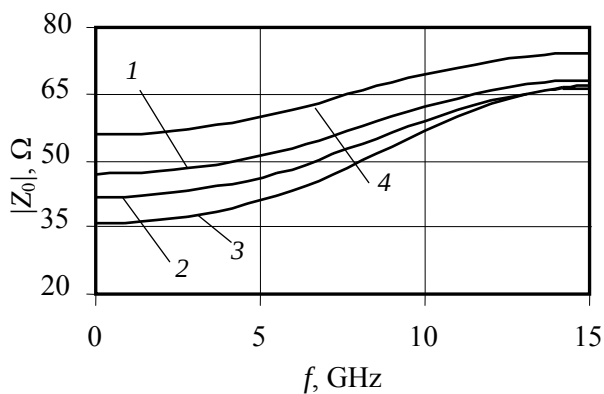
4.4 paveikslas iliustruoja periodinio laidininkų pločio kitimo įtaką sistemos savybėms. Didėjant laidininkų pločių santykiui, lėtinimo koeficientas sparčiai kinta, kai gretimų laidininkų įtampų fazių skirtumas artėja prie $\pi/2$. Taip pat įėjimo varža Z_0 (2 kreivės) ir Z_1 (2' kreivės), staigiai kinta ir tampa skirtingos, kai gretimų laidininkų įtampų fazių skirtumas artėja prie $\pi/2$. Toks reiškinys gali būti aiškinamas tuo, kad elektromagnetinės bangos ilgio ketvirtis tampa artimas



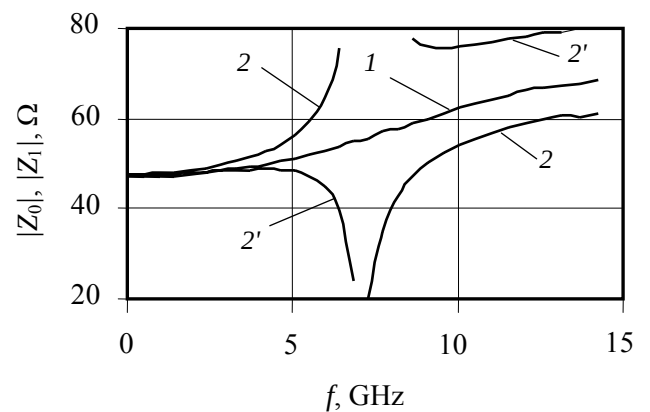
a



a



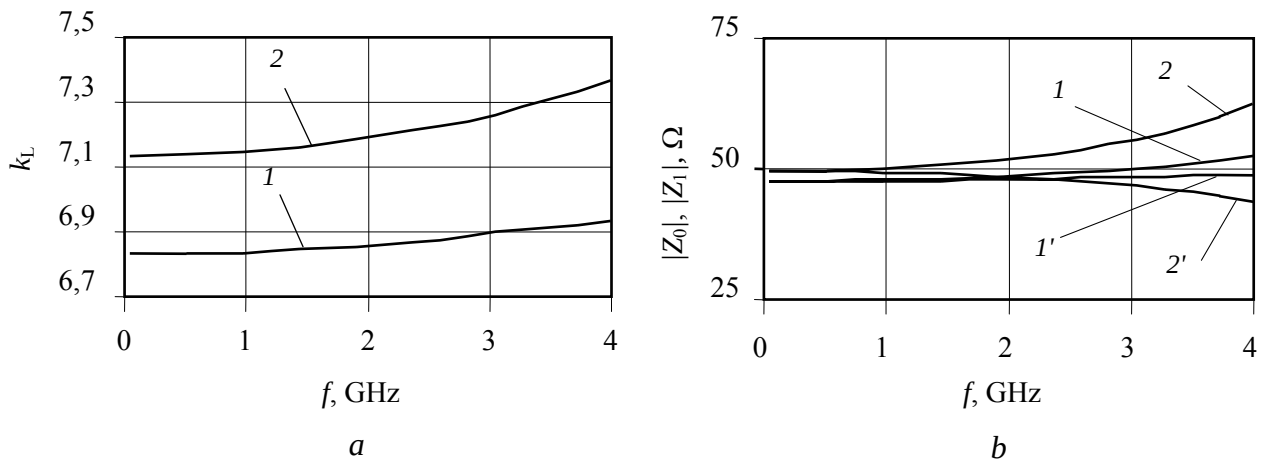
b



b

4.3 pav. Dvipradės spiralinės sistemos su vienodo pločio laidininkais lėtinimo koeficiento (a) ir įėjimo varžos (b) priklausomybės nuo dažnio, kai $h=10$, $L=1,5$; $w_1=0,3$; $w_2=0,7$ ir $d_1=d_2=d$:
1 – $d=1$, $p=0,1$; 2 – $d=1$, $p=0,2$; 3 – $d=1$, $p=0,4$; 4 – $d=0,8$, $p=0,1$ mm

4.4 pav. Dvipradės spiralinės sistemos lėtinimo koeficiento (a) ir įėjimo varžos (b) priklausomybės nuo dažnio, kai $h=10$, $L=1,5$, $p=0,1$, $w_1=0,3$, $w_2=0,7$:
1 – $d_1=d_2=1$; 2 – $d_1=1,1$, $d_2=0,9$ mm



4.5 pav. Dvipradės spiralinės sistemos lėtinimo koeficiento (a) ir įėjimo varžos (b) priklausomybės nuo dažnio, kai $h=10$, $L=1,5$, $p=0,1$, $w_1=0,3$, $w_2=0,7$:
1 – $d_1=1,1$, $d_2=0,9$; 2 – $d_1=1,5$, $d_2=0,5$ mm

vienalytės laidininko atkarpos ilgiui h .

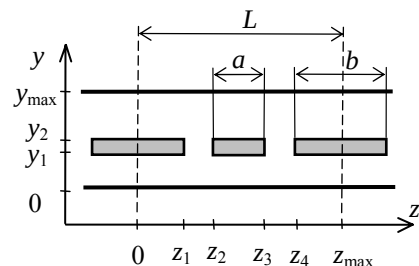
Lėtinimo koeficiento ir įėjimo varžos kitimas riboja dvipradės lėtinimo ir kreipimo sistemos praleidžiamų dažnių juostą. Ji yra mažesnė nei $1/4t_v$, kur t_v yra išilgai daugialaidės linijos laidininko sklindančios elektromagnetinės bangos vėlinimo laikas (4.2 pav.). Gauti rezultatai sutampa su rezultatais gautais automatizuoto projektavimo programiniu paketu *Microwave Office* [143].

4.5 paveikslas iliustruoja spiralinių laidininkų vienalyčių atkarpų ilgio skirtumų įtaką lėtinimo koeficientui ir įėjimo varžai. Didinant laidininkų pločių santykį d_1/d_2 , padidėja lėtinimo koeficientas. Tai būdinga nevienalyčių spiralinių ir meandrinų lėtinimo ir kreipimo sistemų savybėms. Didinant laidininkų pločių santykį d_1/d_2 , įėjimo varža kinta sparčiau.

4.2 Elektrinis laukas dvipradėje spiralinėje lėtinimo ir kreipimo sistemoje

4.2.1 Dvipradės spiralinės lėtinimo ir kreipimo sistemos elektrinio lauko analizė

Pagal atliktą analizę ir [143] gana plačiame dažnių diapazone elektromagnetinės bangos sklaidimo greitis dvipradėje sistemoje mažai priklauso nuo dažnio, todėl elektromagnetinio lauko struktūra sistemoje nepasikeistų, jeigu pjūvyje $y = 0$ (4.2 pav.) būtų elektrinė sienelė. Taigi, elektrinio lauko pasiskirstymas dvipradėje sistemoje turi būti



4.6 pav. Viencilės dvipakopės daugialaidės linijos pjūvis

toks pat, kaip dvipakopėje vieneilėje daugialaidėje linijoje.

Oscilografinių elektroninių vamzdžių nesimetrinės ir simetrinės bėgančiosios bangos kreipimo sistemos, sudarytos iš vienpradžių spiralių, dažniausiai modeliuojamos vieneilėmis vienpakopėmis daugialaidėmis linijomis [6, 179]. Tačiau vienpakopė daugialaidė linija yra atskiras dvipakopės daugialaidės linijos atvejis: kai daugialaidės linijos laidininkų matmenys vienodi, dvipakopės daugialaidės linijos pjūvis tampa toks pat, kaip vienpakopės.

Taigi, nagrinėdami elektrinį lauką, spiralines sistemas galime modeliuoti vieneile dvipakope daugialaide linija (4.6 pav.). Sistemų, sudarytų iš vienpradžių spiralių, modeliuose fazių skirtumas tarp gretimų laidininkų įtampų arba srovių yra θ , dvipradės sistemos modelyje jis yra $(\theta + \pi)$.

Potencialų pasiskirstymui ir elektrinio lauko dedamųjų pasiskirstymui skaičiuoti tinka skaitinis baigtinių skirtumų metodas [50, 180]. Taikant šį metodą, potencialų pasiskirstymas skaičiuojamas priartėjimo būdu. Pakanka nagrinėti vieną daugialaidės linijos periodą. Atliekant skaičiavimus, potencialai pjūviuose $z = 0$ ir $z = z_{\max} = k\Delta$ skaičiuojami atsižvelgiant, kad $\varphi(-1) = \varphi(k-1)$ ir $\varphi(k+1) = \varphi(1)$; čia Δ – tinklelio žingsnis z ašies kryptimi, φ argumentas – tinklelio mazgų numeriai.

Potencialų pasiskirstymai, apskaičiuoti baigtinių skirtumų metodu dvipakopės daugialaidės linijos perioduose, modeliuojančiuose vienpradę ir dvipradę spiralines sistemas, atvaizduoti 4.7 paveiksle.

Žinodami potencialų pasiskirstymą, elektrinio lauko stiprio skersinę ir išilginę dedamąsias bet kuriame pasirinkto tinklelio mazge galime rasti iš formulių:

$$\underline{E}_{ym}(y, z) = -\text{grad}_y \varphi = -\frac{\partial \varphi}{\partial y} \cong -\frac{\Delta \varphi_y(y, z)}{\Delta y}, \quad (4.19)$$

$$\underline{E}_{zm}(y, z) = -\text{grad}_z \varphi = -\frac{\partial \varphi}{\partial z} \cong -\frac{\Delta \varphi_z(y, z)}{\Delta z}; \quad (4.20)$$

čia

$$\Delta \varphi_y(y, z) = \varphi(y + \Delta y, z) - \varphi(y, z),$$

$$\Delta \varphi_z(y, z) = \varphi(y, z + \Delta z) - \varphi(y, z).$$

Bėgančiosios bangos elektroniniuose vamzdžiuose elektronų greitis z ašies kryptimi suderinamas su elektrinio lauko nulinės erdvinės harmonikos sklidimo greičiu. Kitų erdvių harmonikų sklidimo greičiai smarkiai skiriasi nuo elektronų greičio. Todėl galime laikyti, kad elektronų pluoštą kreipia elektrinio lauko skersinės dedamosios nulinė erdvinė harmonika.

Elektrinio lauko skersinės dedamosios nulinės erdvinės harmonikos kompleksinę amplitudę periodinėje sistemoje galime rasti integruodami $\underline{E}_{ym}$ daugialaidės linijos vieno periodo L ribose [50, 142]:

$$\underline{E}_{y0m}(y) = \frac{1}{L} \int_0^L \underline{E}_{ym}(y, z) e^{jk_0 z} dz; \quad (4.21)$$

čia k_0 – nulinės erdvinės harmonikos bangos skaičius z ašies kryptimi

Skersinio elektrinio lauko stiprumo priklausomybę nuo θ ir dažnio galime apibūdinti koeficientu

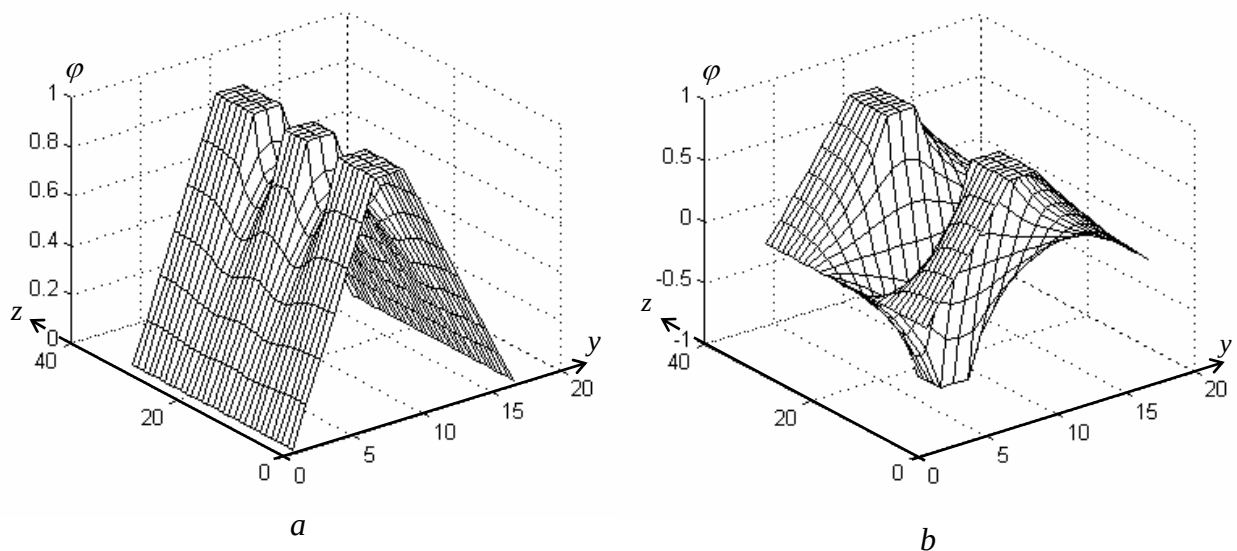
$$K_y = E_{y0m}/E; \quad (4.22)$$

čia $E = U_m/w = 1/w$ – elektrinio lauko stipris elektrostatinėje kreipimo sistemoje, kai $U_m = 1$ V, w – tarpas tarp šios sistemos kreipimo plokštelių. Nagrinėdami elektrinį lauką tarpe tarp y_2 ir $y_{\max}$ (4.6 pav.), imame, kad $w = y_{\max} - y_2$.

Apie išilginės elektrinio lauko dedamosios įtaką elektroniniam pluoštui galime spręsti pagal šio dedamosios nulinę erdvinę harmoniką $\underline{E}_{z0m}$. Ją galime apskaičiuoti taikydami formulę, analogišką (4.21), tik vietoje skersinės dedamosios $\underline{E}_{ym}$ reikia nagrinėti išilginę elektrinio lauko dedamąją $\underline{E}_{zm}$.

4.2.2 Dvipradžių spiralinių lėtinimo ir kreipimo sistemų skaičiavimo rezultatai ir jų aptarimas

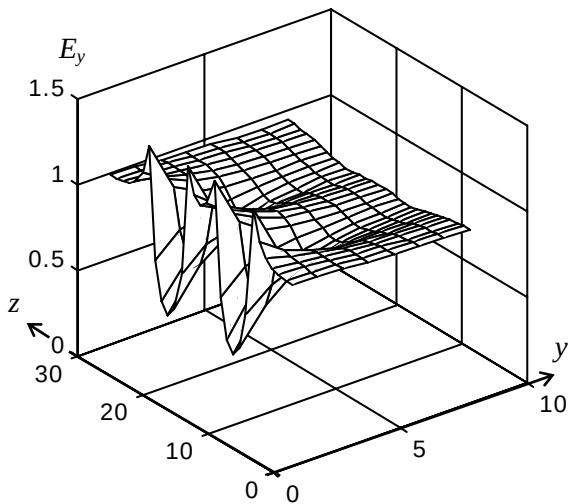
Skersinės ir išilginės elektrinio lauko dedamųjų pasiskirstymai erdvėje tarp daugialaidės linijos (4.6 pav.) laidininkų ir viršutinio ekrano vienpradės ir dvipradės spiralinių sistemų modeliuose atvaizduotas 4.8 ir 4.9 paveiksluose.



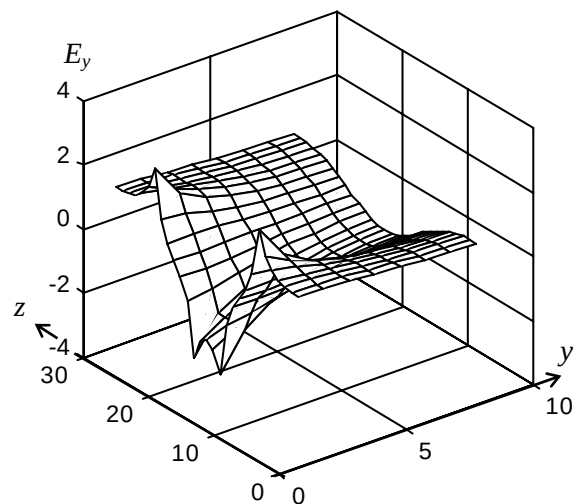
4.7 pav. Potencialų pasiskirstymas vienpradės (a) ir dvipradės (b) spiralinių sistemų modeliuose, kai $\theta = 0$

4.10 ir 4.11 paveiksluose atvaizduotos koeficientų K_y ir K_z , apibūdinančių erdviųjų harmonikų E_{y0m} ir E_{z0m} lygius, priklausomybės nuo fazės kampo θ . Kreivių parametras – gretimų laidininkų plokščių santykis $s = b/a = 2z_1/(z_2 - z_1)$. Grafikų abscisių ašyse atidėti santykiai θ/π ir $\theta/2\pi$ atitinka vienodus dažnius.

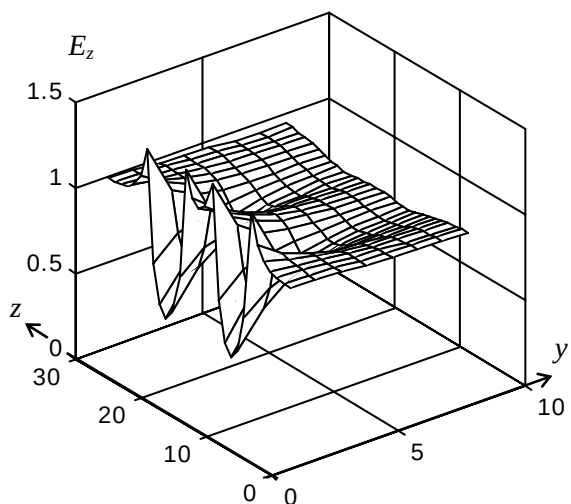
4.10 paveiksle atvaizduotos kreivės apibūdina nulinės erdvinės harmonikos E_{y0m} lygį, pjūvyje $y = (y_2 + y_{\max})/2$. Pagal 4.10 paveikslą, a, sistemoje, sudarytoje iš vienpradžių spiralių, kai tarpas tarp spiralės laidininkų mažas, žemų dažnių srityje (kai mažas θ), koeficientas K_y yra



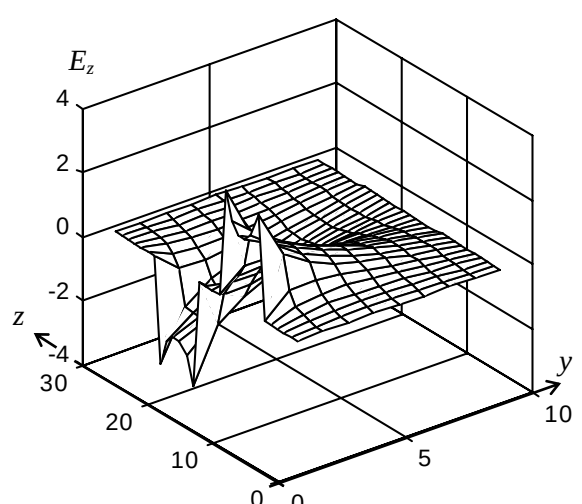
a



a



b



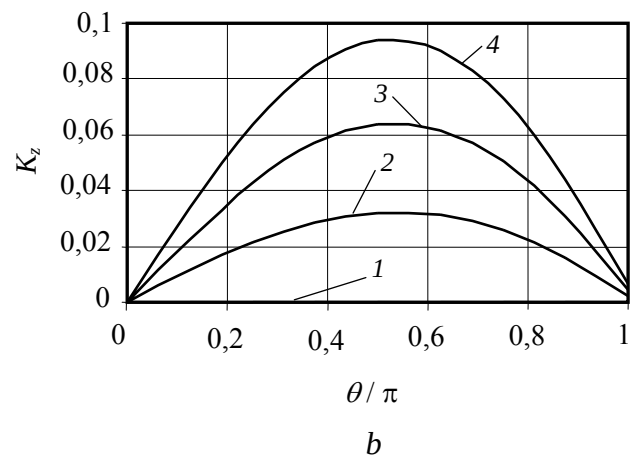
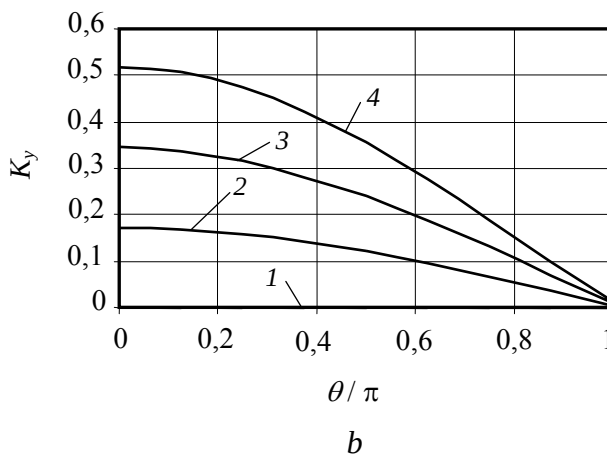
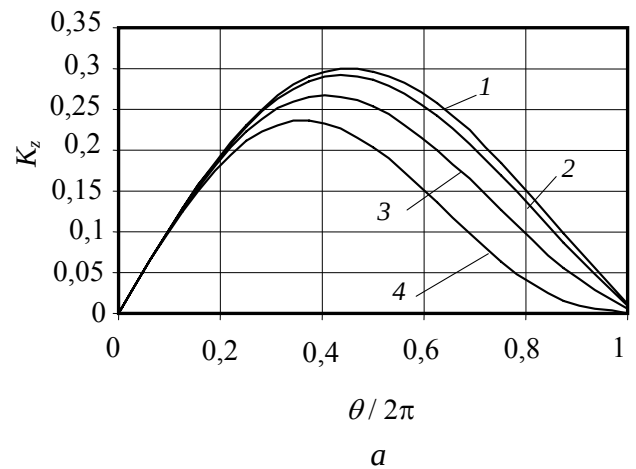
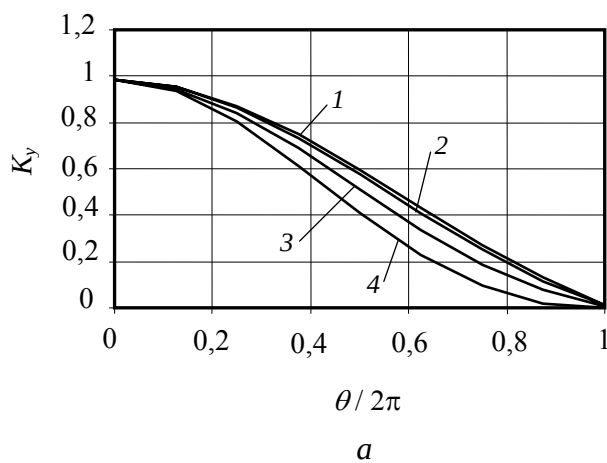
b

4.8 pav. Skersinės (a) ir išilginės (b) elektrinio lauko dedamųjų pasiskirstymai sistemos, sudarytos iš vienpradžių spiralių, modelyje (3 paveikslo daugialaidės linijos dalyje nuo y_2 iki $y_{\max}$), kai $\theta = 0$

4.9 pav. Skersinės (a) ir išilginės (b) elektrinio lauko dedamųjų pasiskirstymai dvipradės spiralinės kreipimo sistemos modelyje (3 paveikslo daugialaidės linijos dalyje nuo y_2 iki $y_{\max}$), kai $\theta = 0$

artimas 1 – elektrinio lauko skersinės dedamosios nulinės erdvinės harmonikos amplitudė beveik tokia pat, kaip elektrinio lauko stipris elektrostatinėje kreipimo sistemoje. Didėjant θ ir dažniui, nulinės erdvinės harmonikos amplitudė mažėja dėl lėkio reiškinio [6]. Kai gretimų laidininkų plokčių santykis didesnis, nulinės erdvinės harmonikos amplitudė labiau priklauso nuo dažnio. Taip yra todėl, kad padidėja elektrono lėkio trukmė virš platesnio laidininko.

Iš 4.10 paveikslo, *b*, matyti, kad dvipradėje spiralinėje sistemoje, kai laidininkų pločiai vienodi, skersinės elektrinio lauko dedamosios nulinės erdvinės harmonikos amplitudė lygi nuliui. Taip yra todėl, kad gretimų vijų potencialai priešingi ir jų sukurtas elektrinis laukas kreipia elektronų pluoštą priešingomis kryptimis. Didėjant laidininkų plokčių santykiui, nulinės erdvinės



4.10 pav. Skersinės elektrinio lauko dedamosios nulinės erdvinės harmonikos priklausomybės nuo fazės kampo θ paprastos (a) ir dvipradės (b) spiralinių kreipimo sistemų modeliuose, kai $x_2 - x_1 = x_4 - x_3 = 16\Delta$, $x_{\max} = 232\Delta$, $y_1 = 16\Delta$, $y_2 = 20\Delta$, $y_{\max} = 60\Delta$, esant įvairiems gretimų laidininkų plokčiams:

- 1 – $2x_2 = b = 100\Delta$, $x_3 - x_2 = a = 100\Delta$, $s = 1$;
- 2 – $b = 120\Delta$, $a = 80\Delta$, $s = 1,5$;
- 3 – $b = 140\Delta$, $a = 60\Delta$, $s = 2,3$;
- 4 – $b = 160\Delta$, $a = 40\Delta$, $s = 4$

4.11 pav. Išilginės elektrinio lauko dedamosios nulinės erdvinės harmonikos priklausomybės nuo fazės kampo θ paprastos (a) ir dvipradės (b) spiralinių kreipimo sistemų modeliuose, kai $x_2 - x_1 = x_4 - x_3 = 16\Delta$, $x_{\max} = 232\Delta$, $y_1 = 16\Delta$, $y_2 = 20\Delta$, $y_{\max} = 60\Delta$, esant įvairiems gretimų laidininkų plokčiams:

- 1 – $2x_2 = b = 100\Delta$, $x_3 - x_2 = a = 100\Delta$, $s = 1$;
- 2 – $b = 120\Delta$, $a = 80\Delta$, $s = 1,5$;
- 3 – $b = 140\Delta$, $a = 60\Delta$, $s = 2,3$;
- 4 – $b = 160\Delta$, $a = 40\Delta$, $s = 4$

harmonikos lygį nusakantis koeficientas K_y didėja. Tačiau net tuo atveju, kai laidininkų pločių santykis yra 4, jis yra tik nedaug didesnis nei 0,5. Taigi, taikant dvipradę spiralinę sistemą, elektroninio vamzdžio jautrumas būtų daug mažesnis nei paprastų sistemų, sudarytų iš vienpradžių spiralių, atveju.

Kai tiriamieji signalai į simetrinę kreipimo sistemą nukreipiami iš parafazinio stiprintuvo, tiek pasižyminčią plokštumine simetrija sistemą, sudarytą iš vienpradžių spiralių, tiek dvipradės spiralinės sistemos modelį elektrine sienele galime padalyti į dvi dalis. Todėl simetrinių sistemų centruose išilginės elektrinio lauko dedamosios stipris lygus 0. Išilginė elektrinio lauko dedamoji veikia pluošto elektronus tik jam nukrypus nuo sistemos centro.

4.11 paveiksle pateiktos koeficiento $K_z = E_{z0m} / E$ priklausomybės nuo fazės kampo θ , kai $y = (y_2 + y_{\max}) / 2$. Pagal skaičiavimų rezultatus (8 pav., a, b), kai $\theta = 0$, spiralinėse sistemose išilginės elektrinio lauko dedamosios nulinės erdvinės harmonikos amplitudė lygi 0, nors išilginio elektrinio lauko stipris nelygus 0 (4.8 pav., b, 4.9 pav., b). Didėjant kampui θ ir dažniui, koeficientas K_z didėja, pasiekia maksimumą ir po to mažėja. Maksimalios K_z reikšmės priklauso nuo kreipimo sistemos tipo ir gretimų laidininkų pločių santykio.

Pagal 4.11 paveikslą, a, sistemoje, sudarytoje iš vienpradžių spiralių, elektrinio lauko išilginės dedamosios nulinė erdvinė harmonika didžiausia, kai gretimų spiralės laidininkų pločiai vienodi. Didėjant laidininkų pločių santykiui, koeficientas K_z ir nulinė erdvinė harmonika E_{z0m} mažėja.

Pagal 4.11 paveikslą, b, dvipradėje spiralinėje kreipimo sistemoje tikrai galima gauti mažą elektrinio lauko išilginės dedamosios lygį. Bet tik tuo atveju, kai gretimų laidininkų pločiai vienodi. Šiuo atveju kreipiančiojo elektrinio lauko stipris lygus 0 (1 kreivė 4.10 pav., b) ir dvipradę spiralinę sistemą negali atlikti elektronų pluošto kreipimo funkcijos. Didėjant gretimų laidininkų pločių santykiui, erdvinės harmonikos E_{z0m} lygis auga. Kai laidininkų pločių santykis lygus 4, koeficiento K_z maksimali reikšmė yra beveik 0,1. Ji apie 2,5-3 kartus mažesnė nei sistemoje, sudarytoje iš vienpradžių spiralių (4.11 pav., a). Tai pastebėję turime nepamiršti, kad kreipiančiojo elektrinio lauko stipris dvipradėje sistemoje daug mažesnis. Nagrinėdami santykius E_{y0m} / E_{z0m} rastume, kad elektrinio lauko išilginės dedamosios lygį taikant dvipradę spiralinę kreipimo sistemą įmanoma sumažinti praktiškai tik kreipiančiojo elektrinio lauko stiprio ir elektroninio vamzdžio jautrio mažėjimo sąskaita.

Vėlgi lygindami simetrines ir nesimetrines spiralines kreipimo sistemas, turime atsižvelgti, kad nesimetrinėse kreipimo sistemose elektronų pluoštas patenka į kreipimo sistemą pjūvyje $y = (y_2 + y_{\max}) / 2$. Todėl nesimetrinėse sistemose išilginės elektrinio lauko dedamosios įtaka elektronų pluoštui didesnė nei simetrinėse.

4.3 Dvipradė spiralinė lėtinimo ir kreipimo sistema su vidiniu ekranu, jos modelis ir savybių analizė

4.3.1 Dvipradės spiralinės lėtinimo ir kreipimo sistemos su skirtingu ir pastoviu spiralių pločiu modelis

Siekdami pagerinti dvipradės spiralinės lėtinimo ir kreipimo sistemos savybes, į bendraašių tarpusavyje susuktų spiralių sistemą patalpinsime vidinį ekraną. Tokia konstrukcija, kai dviejų spiralių laidininkų pločiai skirtingi, bet pastovaus pločio, pavaizduota 4.12 paveiksle.

Dvipradės spiralinės sistemos su vidiniu ekranu lėtinimo ir kreipimo sistemos analizei naudosime daugialaidžių linijų metodą. Tokios sistemos modelis pavaizduotas 4.13 paveiksle. Daugialaidės linijos atkarpa sudaryta iš vienos eilės laidininkų ir dviejų laidininkų periode.

Remdamiesi [6, 44], daugialaidės linijos laidininkų potencialai ir srovės išreiškiami lygtimis:

$$\underline{U}_n(x) = [\underline{A}_{U1} + (-1)^n \underline{A}_{U2}] e^{-jn\theta}, \quad (4.23)$$

$$\underline{I}_n(x) = j[Y_n(\theta)\underline{A}_{I1} + (-1)^n Y_n(\pi + \theta)\underline{A}_{I2}] e^{-jn\theta}; \quad (4.24)$$

čia n – yra laidininko numeris eilėje; $\underline{A}_{U1}$, $\underline{A}_{U2}$, $\underline{A}_{I1}$ ir $\underline{A}_{I2}$ koeficientai, kurie išreiškiami:

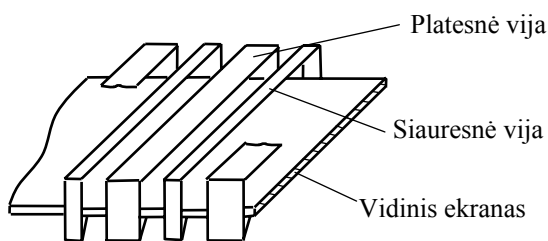
$$\underline{A}_{U1} = \underline{A}_1 \sin kx + \underline{A}_2 \cos kx, \quad (4.25)$$

$$\underline{A}_{U2} = \underline{A}_3 \sin kx + \underline{A}_4 \cos kx, \quad (4.26)$$

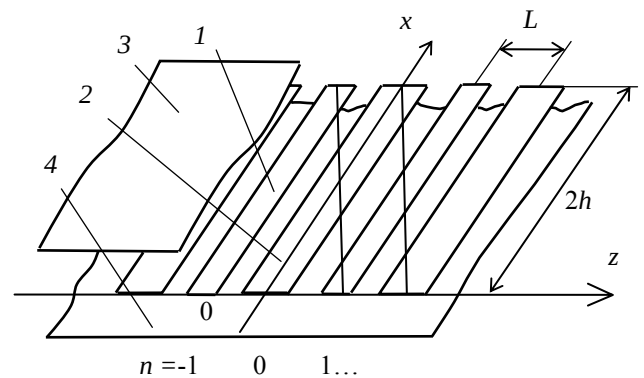
$$\underline{A}_{I1} = \underline{A}_1 \cos kx - \underline{A}_2 \sin kx, \quad (4.27)$$

$$\underline{A}_{I2} = \underline{A}_3 \cos kx - \underline{A}_4 \sin kx; \quad (4.28)$$

čia $\underline{A}$ amplitudiniai koeficientai. Ir čia daugialaidė linija sudaryta iš dviejų laidininkų periode, todėl laidininkų su lyginiu numeriu n (platesni laidininkai) banginiai laidumai yra vienodi ir gali būti



4.12 pav. Dvipradės spiralinės lėtinimo ir kreipimo sistemos, sudarytos iš vienos į kitą įsuktų skirtingo ir pastovaus pločio bendraašių spiralių ir vidinio ekrano, fragmentas



4.13 pav. Spiralinės sistemos modelis: 1, 2 – daugialaidės linijos laidininkai; 3, 4 – ekranai

pažymėti Y_1 , o laidininkų su nelyginiu numeriu n (siauresni laidininkai) banginiai laidumai – Y_2 .

Daugialaidės linijos atkarpa modeliuoja dvipradę spiralinę sistemą, jeigu tenkinamos tokios kraštinės sąlygos:

$$\underline{U}_{(-1)}(h) = \underline{U}_1(0), \quad (4.29)$$

$$\underline{I}_{(-1)}(h) = \underline{I}_1(0), \quad (4.30)$$

$$\underline{U}_0(h) = \underline{U}_2(0), \quad (4.31)$$

$$\underline{I}_0(h) = \underline{I}_2(0). \quad (4.32)$$

Išrašę (4.23), (4.24) įtampų ir srovių išraiškas į simetrijos ir kraštinių sąlygų formules (4.29)–(4.32) gauname algebrinių lygčių sistemą. Pašalinę kompleksinius amplitudinius koeficientus $\underline{A}_1$, $\underline{A}_2$, $\underline{A}_3$ ir $\underline{A}_4$, gauname dispersinę lygtį:

$$k = \theta / h, \quad (4.33)$$

čia h – pusė vijos ilgio.

Toliau lėtinimo koeficientas ir dažnis apskaičiuojamas iš formulių panašių į (4.14) ir (4.15):

$$k_L = \theta / kL = h / L, \quad (4.34)$$

$$f = kc_0 / 2\pi.$$

Sistemos įėjimo varža skaičiuojama:

$$Z_{\text{IN}n} = \frac{U_n}{I_n}. \quad (4.35)$$

Kaip matome, tokioje sistemoje gali sklisti dvi nepriklausomos bangos, kurių įtampos amplitudės yra vienodos, tik su skirtingoms fazės kampo reikšmėmis θ ir $\theta + \pi$

Vieną spiralę galima įžeminti ir panaudoti ją kaip papildomą ekraną. Tuomet $\underline{U}_1(x) = 0$, $\underline{A}_1 = \underline{A}_3$, $\underline{A}_2 = \underline{A}_4$ ir įėjimo varžos skaičiavimas tampa gana nesudėtingas:

$$Z_0(0) = \frac{U_0(0)}{I_0(0)} = \frac{2}{Y_1(\theta) + Y_1(\theta + \pi)}, \quad (4.36)$$

čia $Y_1(\theta) + Y_1(\theta + \pi) = Y(0) + Y(\pi)$ yra pastovūs.

Taigi, dvipradė spiralinė sistema, kurios spiralių pločiai skirtingi ir pastovaus pločio bei su vidiniu ekranu gali turėti pastovų lėtinimo koeficientą ir nekintančią įėjimo varžą plačiame dažnių ruože.

4.3.2 Dvipradės spiralinės lėtinimo ir kreipimo sistemos su kintamu spiralių pločiu modelis

Analizuokime dvipradę spiralinę lėtinimo ir kreipimo sistemą, sudarytą iš dviejų įsuktų viena į kitą bendrašių spiralių su besikeičiančio pločio laidininkais su vidiniu ekranu. Tokia konstrukcija pavaizduota 4.14 paveiksle. Tokios sistemos spirālės susideda iš siaurų ir plačių dalių.

Kaip ir dvipradės spiralinės sistemos be vidinio ekrano atveju, tokią sistemą galime modeliuoti daugialaide linija, kaip parodyta 4.2 paveiksle. Modeliui panaudota dvieilės dvipakopės daugialaidės linijos atkarpa. Ji sudaryta iš dviejų daugialaidės linijos laidininkų eilių ir dviejų laidininkų periode. Pagal [6], įtampų ir srovių išraiškos panašios į (4.23) ir (4.24):

$$\underline{U}_{mn}(x) = [\underline{B}_{U1} + (-1)^n \underline{B}_{U2}] e^{-jn\theta}, \quad (4.37)$$

$$\underline{I}_{mn}(x) = j[Y_n(\theta) \underline{B}_{I1} + (-1)^n Y_n(\pi + \theta) \underline{B}_{I2}] e^{-jn\theta}, \quad (4.38)$$

Koeficientai $\underline{B}_{U1}$, $\underline{B}_{U2}$, $\underline{B}_{I1}$ ir $\underline{B}_{I2}$ išreiškiami formulėmis:

$$\underline{B}_{U1} = \underline{A}_{m1} \sin kx + \underline{A}_{m2} \cos kx, \quad (4.39)$$

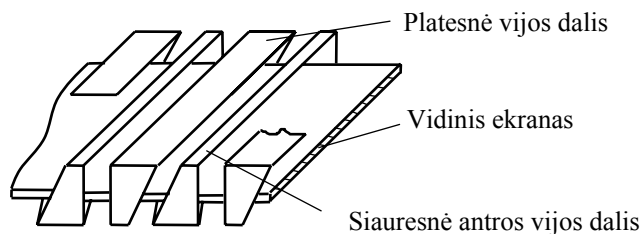
$$\underline{B}_{U2} = \underline{A}_{m3} \sin kx + \underline{A}_{m4} \cos kx, \quad (4.40)$$

$$\underline{B}_{I1} = \underline{A}_{m1} \cos kx - \underline{A}_{m2} \sin kx, \quad (4.41)$$

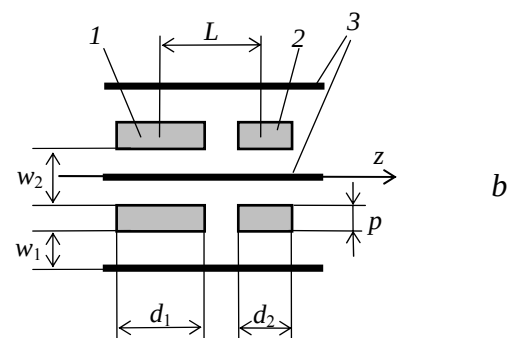
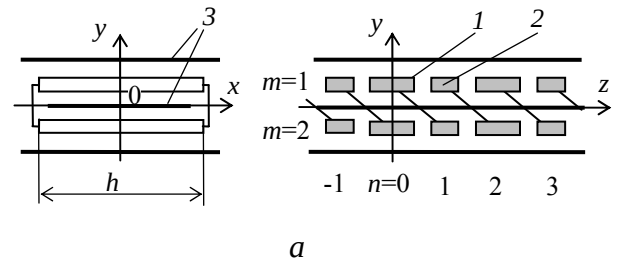
$$\underline{B}_{I2} = \underline{A}_{m3} \cos kx - \underline{A}_{m4} \sin kx. \quad (4.42)$$

Kadangi daugialaidė linija sudaryta iš dviejų laidininkų periode, ir šiuo atveju laidininkų su lyginiu numeriu n (platesni laidininkai) banginiai laidumai yra vienodi ir gali būti pažymėti Y_1 , o laidininkų su nelyginiu numeriu n (siauresni laidininkai) banginiai laidumai – Y_2 . Kai spiralių potencialai – priešingi, turi būti tenkinamos tokios simetrijos sąlygos:

$$\underline{U}_{10}(0) = -\underline{U}_{20}(0), \quad (4.43)$$



4.14 pav. Dvipradės spiralinės lėtinimo ir kreipimo sistemos, sudarytos iš vienos į kitą įsuktų kintamo pločio bendrašių spiralių ir vidinio ekrano, fragmentas



4.15 pav. Dvipradės spiralinės sistemos su vidiniu ekranu modelis (a) ir modelio daugialaidės linijos periodas (b): 1, 2 – linijos laidininkai; 3 – ekranai

$$\underline{I}_{10}(0) = \underline{I}_{20}(0), \quad (4.44)$$

$$\underline{U}_{11}(0) = -\underline{U}_{21}(0), \quad (4.45)$$

$$\underline{I}_{11}(0) = \underline{I}_{21}(0). \quad (4.46)$$

Daugialaidės linijos atkarpa modeliuoja dvipradę spiralinę sistemą su vidiniu ekranu, jeigu tenkinamos tokios kraštinės sąlygos:

$$\underline{U}_{10}(h/2) = \underline{U}_{21}(h/2), \quad (4.47)$$

$$\underline{I}_{10}(h/2) = -\underline{I}_{21}(h/2), \quad (4.48)$$

$$\underline{U}_{20}(h/2) = \underline{U}_{1(-1)}(h/2), \quad (4.49)$$

$$\underline{I}_{20}(h/2) = -\underline{I}_{1(-1)}(h/2). \quad (4.50)$$

Išrašę (4.37), (4.38) įtampų ir srovių išraiškas į simetrijos ir kraštinių sąlygų formules (4.43)–(4.50) gauname algebrinių lygčių sistemą. Pašalinę koeficientus $\underline{A}_{m1}$, $\underline{A}_{m2}$, $\underline{A}_{m3}$ ir $\underline{A}_{m4}$, gauname dispersinę lygtį:

$$\begin{aligned} & \frac{Y_1(\theta)Y_2(\pi+\theta) + Y_2(\theta)Y_1(\pi+\theta)}{Y_1(\theta)Y_1(\pi+\theta) + Y_2(\theta)Y_2(\pi+\theta)} \times \\ & \times \left(\frac{1}{\tan^2(kh/2)} + \tan^2 kh - \frac{\cot(\theta/2) - \tan(\theta/2)}{\tan \theta} \right) = \frac{\cot(\theta/2) + \tan(\theta/2)}{\sin \theta}. \end{aligned} \quad (4.51)$$

Spręsdami dispersinę lygtį, galime rasti, kaip bangos skaičius k priklauso nuo kampo θ . Žinodami θ ir k reikšmes galime rasti sistemos lėtinimo koeficiento k_L ir dažnio f reikšmes iš formulių panašių į (4.14) ir (4.15):

$$k_L = \theta / kL, \quad f = kc_0 / 2\pi.$$

Taip pat galime rasti įėjimo varžos reikšmes. Kaip minėjome, ji priklauso nuo koordinatės x . Kai $x = 0$ įėjimo varža priklauso nuo laidininko numerio. Kai $n = 0$ ji išreiškiama:

$$Z_0 = \frac{U_{10}(0) - U_{20}(0)}{I_{10}(0) + I_{20}(0)} = \frac{\tan(kh/2) \cot(\theta/2) - S \tan(kh/2) \tan(\theta/2)}{Y_1(\pi+\theta) + SY_1(\theta)}. \quad (4.52)$$

Kai $n = 1$:

$$Z_1 = \frac{U_{11}(0) - U_{21}(0)}{I_{11}(0) + I_{21}(0)} = \frac{\tan(kh/2) \cot(\theta/2) + S \tan(kh/2) \tan(\theta/2)}{Y_2(\pi+\theta) - SY_2(\theta)}. \quad (4.53)$$

Dydis S (4.52) ir (4.53) formulėse išreiškiamas:

$$S = \frac{Y_2(\pi+\theta) \sin \theta - \tan^2(kh/2) \cot(\theta/2)(Y_1(\pi+\theta) + Y_2(\pi+\theta) \cos \theta)}{Y_2(\theta) \sin \theta - \tan^2(kh/2) \tan(\theta/2)(Y_1(\theta) - Y_2(\theta) \cos \theta)}.$$

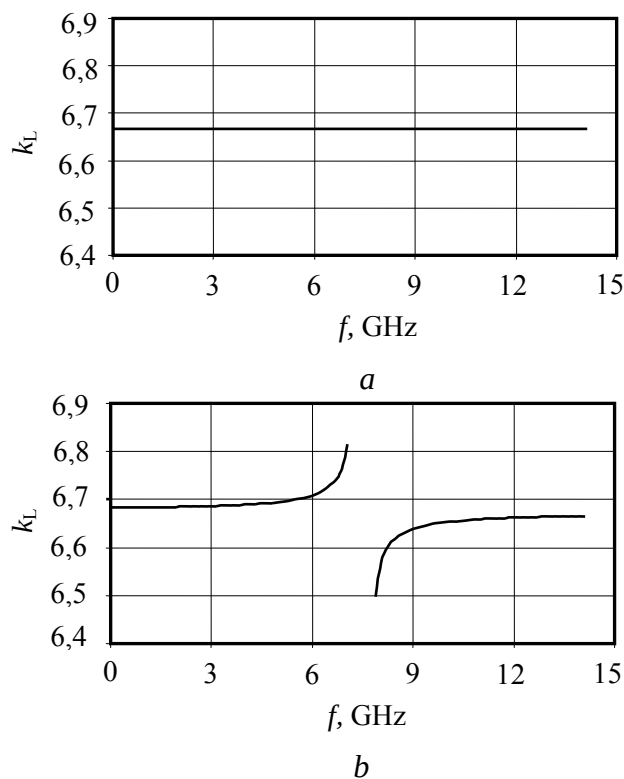
4.3.3 Dvipradžių spiralinių lėtinimo ir kreipimo sistemų su vidiniu ekranu skaičiavimo rezultatai ir jų aptarimas

Sistemos su pastoviu ir skirtingu spiralinių pločiu ir vidiniu ekranu lėtinimo koeficiento k_L ir įėjimo varžos Z_0 reikšmės, kai $2h = 20$, $L = 1,5$, $p = 0,1$, $w_1 = 0,3$, $w_2 = 0,7$ mm pateiktos 4.1 lentelėje. Tokios sistemos lėtinimo koeficientas į įėjimo varžą yra pastovi ir nepriklauso nuo dažnio. Norint gauti tokią dvipradės sistemos savybę, reikia įžeminti vieną spiralę.

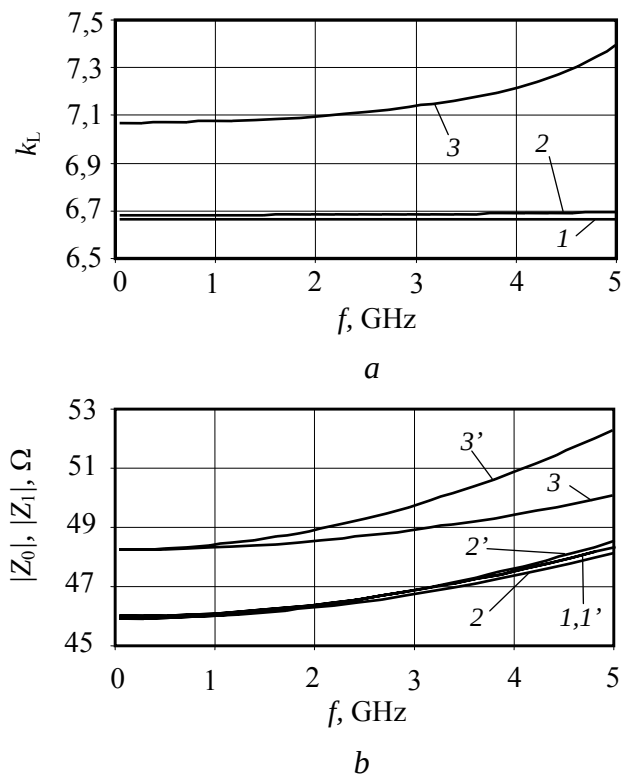
Lėtinimo koeficiento priklausomybė nuo dažnio sistemos su vienodo pločio spiralėmis pavaizduota 4.16 paveiksle, a.

4.16 paveikslas, b, iliustruoja, kaip laidininkų pločių periodinio kitimo įtaką dvipradės sistemos lėtinimo koeficiento priklausomybei nuo dažnio. Dėl periodinio laidininkų pločio kitimo lėtinimo koeficientas ima staigiai kisti, kai fazės kampas tarp gretimų laidininkų įtampų ar srovių artėja prie $\theta = \pi/2$. Toks lėtinimo koeficiento kitimas lemia sklindančio signalo fazinius dažninius išskraipymus ir riboja sistemos praleidžiamų dažnių juostą.

Gauta dvipradės spiralinės sistemos užtvarinė juosta yra už bėgančiosios bangos elektroninio vamzdžio praleidžiamų dažnių juostos, todėl jos galime nevertinti. Tuomet galime analizuoti



4.16 pav. Dvipradės lėtinimo ir kreipimo sistemos lėtinimo koeficiento priklausomybė nuo dažnio, kai $h = 10$, $L = 1,5$, $p = 0,1$, $w_1 = 0,3$, $w_2 = 0,7$:
a – $d_1 = d_2 = 1$; b – $d_1 = 1,1$, $d_2 = 0,9$ mm



4.17 pav. Dvipradės lėtinimo ir kreipimo sistemos su vidiniu ekranu lėtinimo koeficiento (a) ir įėjimo varžos (b) priklausomybės nuo dažnio, kai $h = 10$, $L = 1,5$, $p = 0,1$, $w_1 = 0,3$, $w_2 = 0,7$:
1 – $d_1 = d_2 = 1$; 2 – $d_1 = 1,1$, $d_2 = 0,9$;
3 – $d_1 = 1,5$, $d_2 = 0,5$ mm

sistemos savybes žemesniuose dažniuose, kaip parodyta 4.17 paveiksle. 4.17 paveikslas, *a*, iliustruoja laidininkų pločio kitimo įtaką lėtinimo koeficientui (1, 2, 3 kreivės) ir 4.17 paveikslas, *b*, – įėjimo varžoms Z_0 (1, 2, 3 kreivės) ir Z_1 (1', 2', 3' kreivės).

4.1 lentelė. Lėtinimo koeficiento ir įėjimo varžos reikšmės, kai viena spiralė (d_2) įžeminta

d_1, mm	d_2, mm	k_L	Z_0, Ω
1	1	6,67	50,9
1,1	0,9	6,67	54,7
1,5	0,5	6,67	76,4

Remdamiesi 4.17 paveikslu, *a*, didinant laidininkų pločių santykį d_1/d_2 , didėja lėtinimo koeficiento reikšmė. Tai būdinga ir kitokios konstrukcijos nevienalytėms spiralinėms ir meandrinėms sistemoms [6, 179, 181]. Santykio d_1/d_2 didinimas taip pat lemia didesnę sistemos įėjimo varžų priklausomybę nuo dažnio (4.17 pav., *b*).

Tuo pačiu svarbu pastebėti, kad sistemos su kintamo pločio laidininkais ir vidiniu ekranu lėtinimo koeficiento ir įėjimo varžos mažiau priklauso nuo dažnio, nei tuo atveju kai naudojama sistema be vidinio ekrano, kuri buvo analizuota [129, 181] ir 4.1 skyriuje. Be to, svarbu pažymėti, kad sistemos įėjimo varžos reikšmė praleidžiamų dažnių juostoje didėja, didėjant dažniui. Tai leidžia pagerinti sistemos dispersines charakteristikas ir kompensuoti signalų iškraipymus sistemoje dėl kitų faktorių [6, 44, 179].

4.4 Išvados

1. Dvieilė dvipakopė daugialaidės linijos atkarpa gali būti taikoma lėtinimo ir kreipimo sistemoms su įsuktomis viena į kitą bendraašėmis spiralėmis modeliuoti.
2. Dvipradės be vidinio ekrano lėtinimo ir kreipimo sistemos su skirtingo pločio laidininkais praleidžiamų dažnių juosta yra siauresnė nei $1/4t_v$.
3. Dvipradėse be vidinio ekrano lėtinimo ir kreipimo sistemose su įsuktomis viena į kitą bendraašėmis spiralėmis ir su skirtingo pločio laidininkais, mažinant laidininkų pločių santykį d_1/d_2 , mažėja lėtinimo koeficientas ir įėjimo varža mažiau priklauso nuo dažnio.
4. Kreipiančiojo elektrinio lauko stipris dvipradėje kreipimo sistemoje be vidinio ekrano labai priklauso nuo gretimų vijų laidininkų pločių santykio. Oscilografiniam elektroniniam vamzdžiui su dviprade spiraline kreipimo sistema be vidinio ekrano būtų būdingas mažas jautris.
5. Elektrinio lauko išilginės dedamosios nulinės erdvinės harmonikos amplitudės stipris dvipradėje be vidinio ekrano spiralinėje sistemoje yra mažas tik tuo atveju, kai gretimų vijų laidininkų pločiai artimi.

6. Dvipradės spiralinės sistemos, sudarytos iš dviejų viena į kitą įsuktų bendraašių spiralių, savybės galima pagerinti papildomai įdėjus vidinį ekraną: sistemos lėtinimo koeficientas ir įėjimo varža mažiau priklauso nuo dažnio nei tuo atveju, kai dvipradė sistema yra be vidinio ekrano.

5 skyrius

Nevienalyčių lėtinimo ir kreipimo sistemų modelių sudarymas ir savybių analizė

Kartais taikomos spiralinės sistemos, kurių spiralinių laidininkų matmenys kinta išilgai vijos. Bėgančiosios bangos lėtinimo ir kreipimo sistemose, praplatinus vijų dalis elektroninio pluošto kreipimo srityje, pavyksta pasiekti didesnį oscilografinio vamzdžio jautrumą. Tačiau jeigu spiralinio laidininko plotis periodiškai kinta, sistema tampa nevienalytė. Meandrinų vėlinimo bei lėtinimo ir kreipimo sistemų atvejais dėl meandro juostelės pločio skirtumo meandro periode dažninėse charakteristikose atsiranda trūkis [26, 28], rezonansas [31], kai fazių skirtumas θ tarp gretimų laidininkų lygus $\pi/2$. Tuomet meandrinė sistema įgyja juostinio užtvarinio filtro savybes [26, 28, 31]. Žinių apie spiralinių lėtinimo ir kreipimo sistemų savybes, kai spiralė sudaryta iš dviejų skirtingo pločio atkarpų, trūksta. Siekdami atskleisti nevienalytiškumo įtaką spiralinių sistemų savybėms aukštutinių dažnių srityje, išsamiai nagrinėsime spiralinę sistemą, kurios spiralės juostelės plotis kinta – vija sudaryta iš dviejų skirtingo pločio atkarpų.

Svarbūs lėtinimo ir kreipimo sistemų elementai yra lėtinimo elektrodų dielektriniai laikikliai ir jungės tarp traktų elementų. Atsižvelgdami į tai, kad dielektrinių laikiklių matmenys esti nedideli, dėl jų atsirandančius talpinio pobūdžio netolygumus modeliuosime sutelktomis talpomis.

Dėl dielektrinių laikiklių gali padidėti talpos tarp gretimų vijų bei vijų ir ekranų. Kaip žinoma, parazitinių talpų tarp vijų galima išvengti panaudojant šukų pavidalo laikiklius [136]. Todėl šiame skyriuje nagrinėsime tik parazitinių talpų, kurios susidaro tarp lėtinimo elektrodų ir ekranų, įtaką.

Šiame skyriuje nagrinėsime dėl nevienalytiškumo kylančių periodinių netolygumų įtaką lėtinimo ir kreipimo sistemų savybėms. Daugialaidžių linijų metodu sudarysime nevienalyčių lėtinimo ir kreipimo sistemų modelius ir analizuosime jų savybes.

Taip pat atskleisime reiškinius plačiajuosčių traktų ir lėtinimo ir kreipimo sistemų jungėse, išsiaiškinsime šių jungių tobulinimo galimybes. Tuo tikslu, sudarysime bėgančiosios bangos elektroninio vamzdžio signalinio trakto supaprastintą ekvivalentinę schemą, pasinaudodami daugkartinių atspindžių diagramomis išvesime atspindžio koeficientų ir perdavimo funkcijų

išraiškas, nagrinėsime charakteristikas, apibūdinančias signalinio trakto ir elektroninio vamzdžio savybes.

Šio skyriaus svarbiausi rezultatai paskelbti [187, 189-192].

5.1 Nevienalyčių spiralinių lėtinimo ir kreipimo sistemų savybės

5.1.1 Nevienalytės spiralinės lėtinimo ir kreipimo sistemos modelis

Nagrinėkime plokščią spiralinę sistemą (5.1 pav.), kurios spiralės juostelės plotis kinta – vija sudaryta iš dviejų skirtingo pločio atkarpų.

Kaip ir ankstesniuose skyriuose bei [4, 6] sistemos analizei taikysime daugialaidžių linijų metodą. Sistemos modelis atvaizduotas 5.2 paveiksle. Jį sudaro vieneilė vienpakopė nevienalytės daugialaidės linijos atkarpa ir ekranai. Daugialaidės linijos laidininkų potencialai ir srovės išreiškiami lygtimis:

$$\underline{U}_{in}(x) = (\underline{A}_{i1} \sin kx + \underline{A}_{i2} \cos kx) e^{-jn\theta}; \quad (5.1)$$

$$\underline{I}_{in}(x) = jY_i(\theta)(\underline{A}_{i1} \cos kx - \underline{A}_{i2} \sin kx) e^{-jn\theta}, \quad (5.2)$$

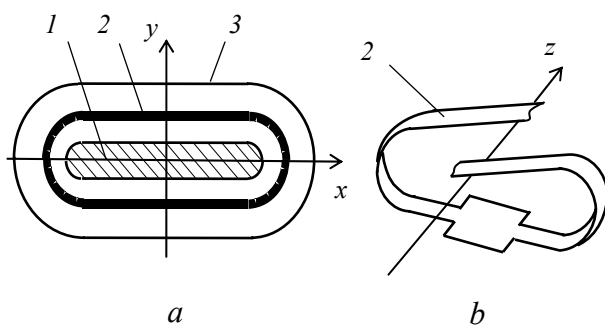
čia i – srities numeris; n – laidininko numeris, $\underline{A}$ – amplitudinis koeficientas, k – bangos skaičius, θ – gretimų daugialaidės linijos laidininkų įtampų bei srovių fazių skirtumas; Y – banginis laidumas.

Daugialaidės linijos atkarpa modeliuoja nevienalytę spiralinę sistemą, jeigu tenkinamos šios kraštinės sąlygos:

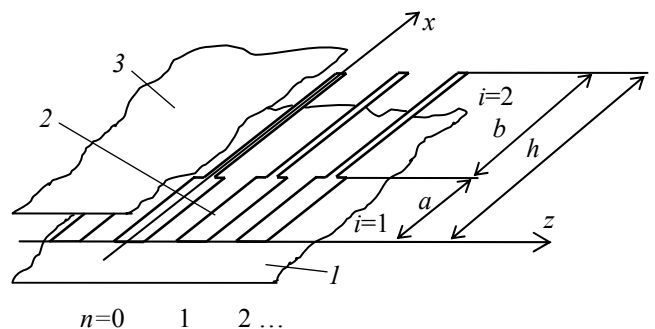
$$\underline{U}_{10}(a) = \underline{U}_{20}(a), \quad (5.3)$$

$$\underline{I}_{10}(a) = \underline{I}_{20}(a), \quad (5.4)$$

$$\underline{U}_{20}(h) = \underline{U}_{11}(0), \quad (5.5)$$



5.1 pav. Spiralinės sistemos skersinis pjūvis (a) ir spiralės vijos vaizdas (b): 1 – vidinis ekranas, 2 – spiralė, 3 – išorinis ekranas



5.2 pav. Nevienalytės spiralinės sistemos modelis: 1, 3 – ekranai, 2 – daugialaidės linijos laidininkas, modeliuojantis spiralės viją

$$\underline{I}_{20}(h) = \underline{I}_{11}(0). \quad (5.6)$$

Irašę į (5.3)–(5.6) įtampų ir srovių išraiškas ir pašalinę koeficientus $\underline{A}_{11}$ ir $\underline{A}_{12}$, gauname lygčių sistemą:

$$\begin{cases} \underline{A}_{21}\underline{D}_{11} + \underline{A}_{22}\underline{D}_{12} = 0, \\ \underline{A}_{21}\underline{D}_{21} + \underline{A}_{22}\underline{D}_{22} = 0; \end{cases} \quad (5.7)$$

čia

$$\underline{D}_{11} = \left(\frac{Y_2(\theta)}{Y_1(\theta)} \cos kh \sin ka + \sin kh \cos ka \right) e^{j\theta} - \sin ka, \quad (5.8)$$

$$\underline{D}_{12} = \left(\cos kh \cos ka - \frac{Y_2(\theta)}{Y_1(\theta)} \sin kh \sin ka \right) e^{j\theta} - \cos ka, \quad (5.9)$$

$$\underline{D}_{21} = \left(\cos kh \cos ka - \frac{Y_1(\theta)}{Y_2(\theta)} \sin kh \sin ka \right) e^{j\theta} - \cos ka, \quad (5.10)$$

$$\underline{D}_{22} = \left(-\frac{Y_1(\theta)}{Y_2(\theta)} \cos kh \sin ka - \sin kh \cos ka \right) e^{j\theta} - \sin ka. \quad (5.11)$$

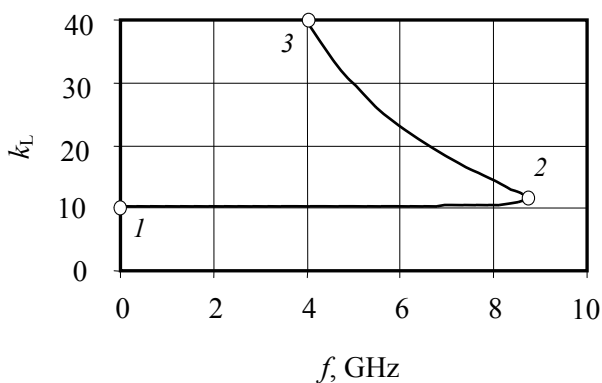
Sprendami šią lygčių sistemą, gauname sistemos dispersinę lygtį, kuriai galima suteikti tokį pavidalą:

$$2 \cos \theta + \left(\frac{Y_1(\theta)}{Y_2(\theta)} + \frac{Y_2(\theta)}{Y_1(\theta)} \right) \sin ka \sin kb - 2 \cos ka \cos kb = 0; \quad (5.12)$$

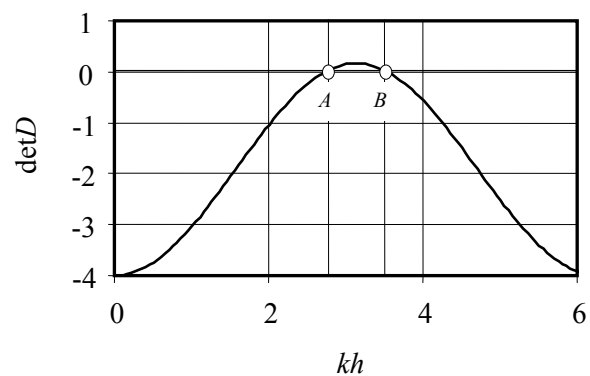
čia $b = h - a$.

Pareikalavus, kad lygčių sistemos (5.7) determinantas būtų lygus nuliui, arba sprendžiant dispersinę lygtį (5.12), galima rasti bangos skaičių k , atitinkantį pasirinktą θ vertę. Tada galime apskaičiuoti lėtinimo koeficientą ir dažnį:

$$k_L = \theta / kL, \quad (5.13)$$



5.3 pav. Lėtinimo koeficiento priklausomybė nuo dažnio, kai $h = 2a = 15$ mm, $Z_1 = 40 \Omega$ ir $Z_2 = 60 \Omega$



5.4 pav. Determinanto priklausomybė nuo kh , kai $h = 2a = 15$ mm, $Z_1 = 40 \Omega$ ir $Z_2 = 60 \Omega$

$$f = kc_0 / 2\pi; \quad (5.14)$$

čia L – spiralės vijų ir daugialaidės linijos laidininkų žingsnis, c_0 – šviesos greitis.

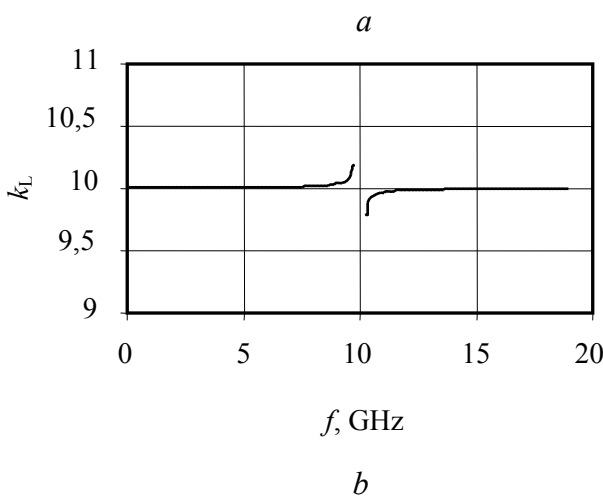
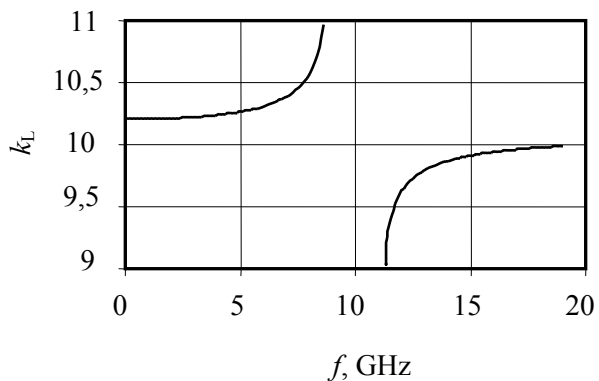
Žinodami koeficientų $\underline{A}_{i1}$ ir $\underline{A}_{i2}$ sąryšius, galime rasti sistemos įėjimo varžos priklausomybę nuo koordinatės x :

$$\underline{Z}_{INi}(x) = \frac{\underline{U}_{i0}(x)}{\underline{I}_{i0}(x)}. \quad (5.15)$$

Daugialaidžių linijų banginiai laidumai skaičiuojami įvairiais metodais [176] ir priklauso nuo fazės kampo θ . Čia, siekdami atskleisti nevienalytiškumo įtaką, priimsime, kad banginiai laidumai Y_1 ir Y_2 yra pastovūs. Taigi pastovios ir juos atitinkančios banginės varžos $Z_1 = 1/Y_1$ ir $Z_2 = 1/Y_2$.

5.1.2 Skaičiavimo rezultatai ir jų analizė

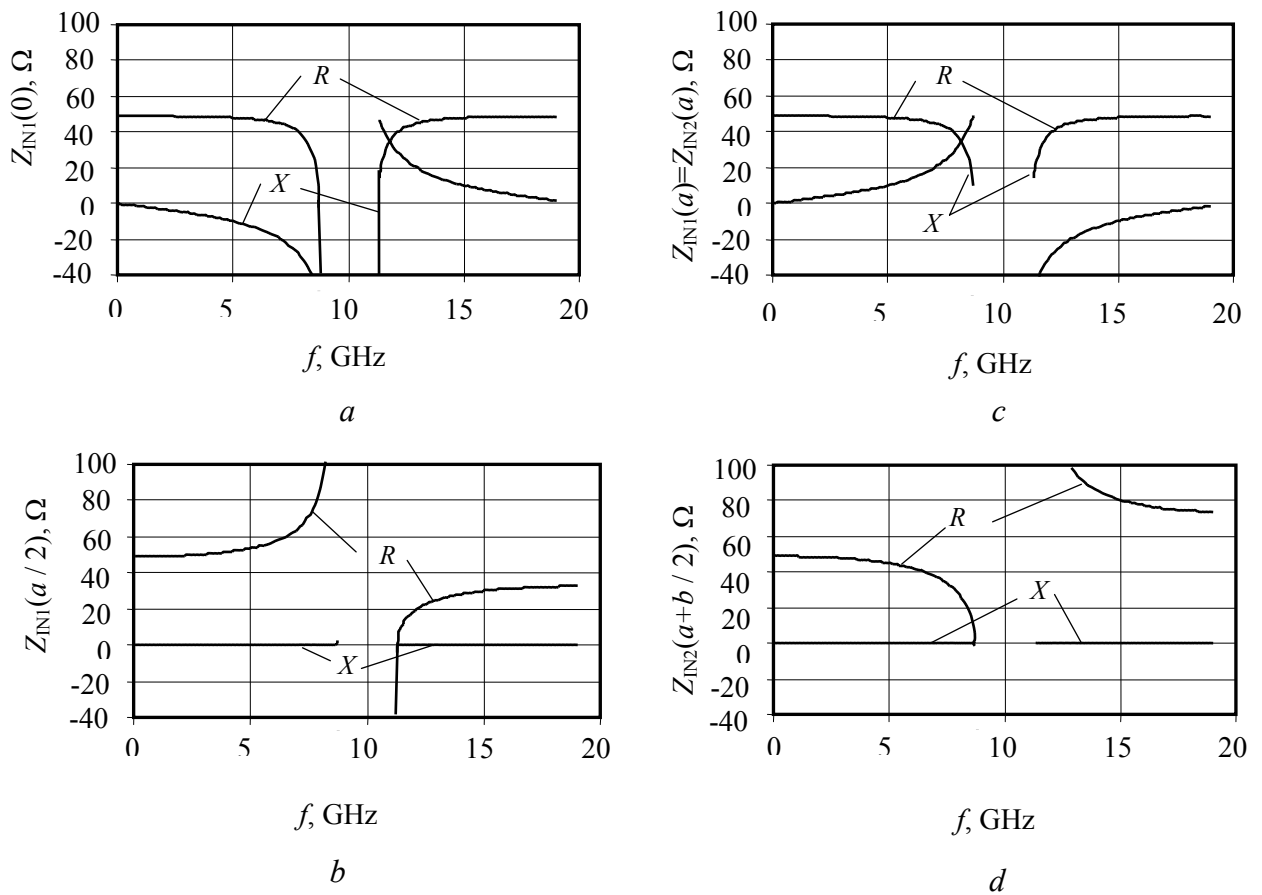
Bangos skaičiaus vertę, ties kuria lygčių sistemos (5.7) determinantas lygus nuliui arba tenkinama dispersinė lygtis (5.12), galime rasti priartėjimo būdu, taikydami ankstesniuose skyriuose



5.5 pav. Lėtinimo koeficiento priklausomybės nuo dažnio, kai $h = 2a = 15$ mm $Z_1 = 40 \Omega$, $Z_2 = 60 \Omega$ (a) ir $Z_1 = 48 \Omega$, $Z_2 = 52 \Omega$ (b)

naudotus algoritmus bei aptartus [4, 6, 26, 44] ir kituose darbuose. Kadangi lygtyse (5.7) ir (5.12) yra trigonometrinių funkcijų, gaunami nevienareikšmiai sprendiniai. Lėtinimo koeficiento priklausomybė nuo dažnio, gauta keičiant fazės kampą θ nuo 0,01 iki 2π , atvaizduota 5.3 paveiksle. Kai fazės kampas artėja prie π , lėtinimo koeficientas sparčiai didėja. Po to gaunama kreivės dalis tarp taškų 2 ir 3. Galima įsitikinti, kad ši kreivės dalis atitinka ne nulines, o minus pirmosios erdvinės harmonikos vėlinimą periodinėje lėtinimo ir kreipimo sistemoje.

5.4 paveikslas iliustruoja lygčių sistemos (5.7) determinanto priklausomybę nuo kh , kai $\theta = \pi$. Taigi, kai $\theta = \pi$, yra du artimi dispersinės lygties sprendiniai. Kai fazės kampas θ šiek tiek mažesnis nei π , nulinę erdvinę harmoniką atitinka sprendinys $kh < \pi$ (taškas A). Kai tik fazės kampas tampa didesnis



5.6 pav. Nevienalytės spiralinės sistemos įėjimo varžos aktyviosios R ir reaktyviosios X dedamųjų priklausomybės nuo dažnio, kai $h = 2a = 15$ mm $Z_1 = 40 \Omega$, $Z_2 = 60 \Omega$

už π , nulinę erdvinę harmoniką atitinka sprendinys $kh > \pi$ (taškas B). Atsižvelgiant į pastebėtą determinanto priklausomybę nuo kh , įvedus į lėtinimo koeficiento skaičiavimo algoritmą papildomas sąlygas, gaunamos 5.5 paveiksle atvaizduotos lėtinimo koeficiento priklausomybės nuo dažnio. Jos liudija, kad kai $\theta = \pi$, gaunami nevienalyčių spiralinių sistemų charakteristikų $k_L(f)$ trūkiai.

5.6 paveiksle atvaizduotos įėjimo varžos aktyviosios ir reaktyviosios dedamųjų priklausomybės nuo dažnio pjūviuose $x = 0$, $a/2$, a ir $(a+b/2)$. Grafikai iliustruoja, kad visuose nurodytuose pjūviuose sistemos įėjimo varžos modulis sparčiai kinta. Dėl sistemos charakteristikų trūkių, fazės kampui θ artėjant prie π , nevienalytė spiralinė sistema įgyja užtvarinio filtro savybes. Panašios išvados gaunamos, nagrinėjant nevienalyčių meandrinį sistemų savybes [26].

Pagal 5.5 paveikslą užtvarinės juostos plotis priklauso nuo banginių laidumų Y_1 ir Y_2 santykio. Kai spiralės vijų vienalyčių atkarpų ilgiai vienodi ($a = b$), dispersinė lygtis (5.12) tampa paprastesnė:

$$2 \cos \theta + \left(\frac{Y_1(\theta)}{Y_2(\theta)} + \frac{Y_2(\theta)}{Y_1(\theta)} \right) \sin^2 \frac{kh}{2} - 2 \cos^2 \frac{kh}{2} = 0. \quad (5.16)$$

Tuomet laikydami, kad $\theta = \pi$ ir $\cos \theta = 1$, galime gauti (5.16) lygties sprendinius, atitinkančius A ir B taškus (5.4 pav.). Šie sprendiniai atitinka užtvarinės juostos ribas. Taigi užtvarinę juostą apibrėžia sąlygos:

$$\pi - \alpha < kh < \pi + \alpha ; \quad (5.17)$$

čia

$$\alpha = 2 \arccos \frac{2}{\sqrt{S(\theta) + 1/S(\theta)}}, \quad (5.18)$$

$$S(\theta) = Y_2(\theta)/Y_1(\theta). \quad (5.19)$$

Taigi kuo didesnis santykis $S(\theta)$ ir kuo didesnis sistemos elektrinis nevienalytiškumas aukštutinių dažnių srityje, tuo platesnė jos užtvarinė juosta ir siauresnė praleidžiamų dažnių juosta.

5.2 Laikiklių įtaka spiralinių ir meandrinių sistemų savybėms

5.2.1 Spiralinės sistemos modelis

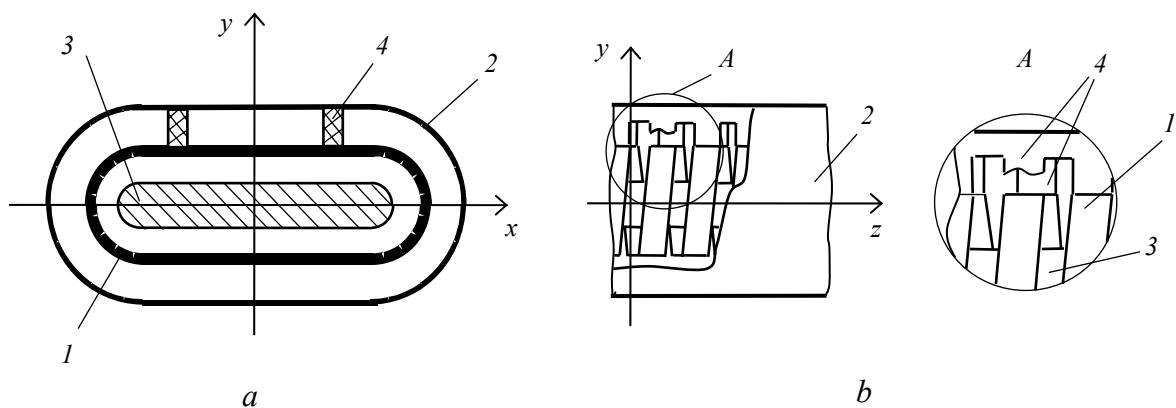
Nagrinėjamos spiralinės sistemos skersinis bei išilginis pjūviai pateikti 5.7 paveiksle. Jos modelis atvaizduotas 5.8 paveiksle. Jį sudaro vieneilė vienpakopė daugialaidės linijos atkarpa. Talpos C_1 ir C_2 modeliuoja netolygumus, atsirandančius dėl dielektrinių laikiklių.

Daugialaidės linijos laidininkų potencialai ir srovės išreiškiami lygtimis [6]:

$$\underline{U}_{in}(x) = (\underline{A}_{i1} \sin kx + \underline{A}_{i2} \cos kx) e^{-jn\theta}, \quad (5.20)$$

$$\underline{I}_{in}(x) = jY_i(\theta)(\underline{A}_{i1} \cos kx - \underline{A}_{i2} \sin kx) e^{-jn\theta}; \quad (5.21)$$

čia i – srities numeris, n – laidininko numeris, $\underline{A}$ – amplitudinis koeficientas, k – bangos skaičius, θ – gretimų daugialaidės linijos laidininkų įtampų ar srovių fazių skirtumas; $Y(\theta)$ – banginis



5.7 pav. Spiralinės sistemos skersinis (a) ir išilginis (b) vaizdai:

1 – spiralė, 2 – išorinis ekranas, 3 – vidinis ekranas, 4 – šukų pavidalo dielektriniai laikikliai

laidumas.

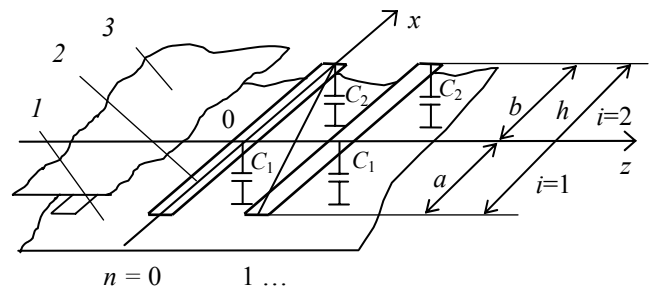
Daugialaidės linijos atkarpa modeliuoja spiralinę sistemą su parazitinėmis talpomis, jeigu tenkinamos sąlygos:

$$\underline{U}_{10}(0) = \underline{U}_{20}(0), \quad (5.22)$$

$$\underline{I}_{10}(0) = \underline{I}_{20}(0) + j\omega C_1 \underline{U}_{10}(0), \quad (5.23)$$

$$\underline{U}_{20}(c) = \underline{U}_{11}(-a), \quad (5.24)$$

$$\underline{I}_{20}(c) = \underline{I}_{11}(-a) + j\omega C_2 \underline{U}_{20}(c). \quad (5.25)$$



5.8 pav. Spiralinės sistemos modelis: 1, 3 – ekranai, 2 – daugialaidės linijos laidininkas, modeliuojantis spiralės viją

Išrašę į (5.22)–(5.25) įtampų ir srovių išraiškas ir pašalinę koeficientus $\underline{A}_{11}$ ir $\underline{A}_{12}$, gauname lygčių sistemą:

$$\begin{cases} \underline{A}_{21} \underline{D}_{11} + \underline{A}_{22} \underline{D}_{12} = 0, \\ \underline{A}_{21} \underline{D}_{21} + \underline{A}_{22} \underline{D}_{22} = 0; \end{cases} \quad (5.26)$$

čia

$$\underline{D}_{11} = e^{j\theta} \sin kb + \sin ka, \quad (5.27)$$

$$\underline{D}_{12} = \frac{\omega C_1}{Y(\theta)} \sin ka + e^{j\theta} \cos kb - \cos ka, \quad (5.28)$$

$$\underline{D}_{21} = \cos kb - \frac{\omega C_2}{Y(\theta)} \sin kb - e^{-j\theta} \cos ka, \quad (5.29)$$

$$\underline{D}_{22} = -(\sin kb + \frac{\omega C_2}{Y(\theta)} \cos kb + \frac{\omega C_1}{Y(\theta)} e^{-j\theta} \cos ka + e^{-j\theta} \sin ka). \quad (5.30)$$

Spręsdami šią lygčių sistemą, gauname sistemos dispersinę lygtį, kuriai galima suteikti tokį pavidalą:

$$\cos \theta = \cos kh - \frac{\omega(C_1 + C_2)}{2Y(\theta)} \sin kh + \frac{\omega^2 C_1 C_2}{2Y^2(\theta)} \sin ka \sin kb; \quad (5.31)$$

čia $h = a + b$.

Pareikalavę, kad lygčių sistemos (5.26) determinantas būtų lygus nuliui, arba spręsdami dispersinę lygtį (5.31), galime rasti bangos skaičių k , atitinkantį pasirinktą θ vertę. Tada galime apskaičiuoti lėtinimo koeficientą ir dažnį:

$$k_L = \theta / kL, \quad (5.32)$$

$$f = kc_0 / 2\pi; \quad (5.33)$$

čia L – spiralės vijų ir daugialaidės linijos laidininkų žingsnis, c_0 – šviesos greitis.

Žinodami koeficientų $\underline{A}_{i1}$ ir $\underline{A}_{i2}$ sąryšį, galime rasti sistemos įėjimo varžą:

$$\underline{Z}_{IN}(x) = \frac{\underline{U}_{i0}(x)}{\underline{I}_{i0}(x)}. \quad (5.34)$$

Bendru atveju ji priklauso nuo koordinatės x .

5.2.2 Meandrinės sistemos modelis

Meandrinės sistemos analizei taip pat taikysime daugialaidžių linijų metodą. Sistemos modelis atvaizduotas 5.9 paveiksle. Jį sudaro vieneilė vienpakopės daugialaidės linijos atkarpa. Talpos C_1 ir C_2 , kaip ir spiralinės sistemos atveju, modeliuoja netolygumus, atsirandančius dėl dielektrinių laikiklių.

Kai lėtinimo ir kreipimo sistemos periode yra du daugialaidės linijos laidininkai, jų potencialai ir srovės išreiškiami lygtimis [6]:

$$\underline{U}_{in}(x) = (\underline{A}_{i1} \sin kx + \underline{A}_{i2} \cos kx) e^{-jn\theta} + (\underline{A}_{i3} \sin kx + \underline{A}_{i4} \cos kx) e^{-jn(\theta+\pi)}, \quad (5.35)$$

$$\underline{I}_{in}(x) = jY(\theta)(\underline{A}_{i1} \cos kx - \underline{A}_{i2} \sin kx) e^{-jn\theta} + jY(\theta+\pi)(\underline{A}_{i3} \cos kx - \underline{A}_{i4} \sin kx) e^{-jn(\theta+\pi)}. \quad (5.36)$$

Daugialaidės linijos atkarpa modeliuoja meandrinę sistemą su parazitinėmis talpomis, jeigu tenkinamos šios sąlygos:

$$\underline{U}_{1(-1)}(0) = \underline{U}_{2(-1)}(0), \quad (5.37)$$

$$\underline{I}_{1(-1)}(0) = \underline{I}_{2(-1)}(0) + \underline{U}_{1(-1)}(0) j\omega C_1, \quad (5.38)$$

$$\underline{U}_{2(-1)}(b) = \underline{U}_{20}(b), \quad (5.39)$$

$$\underline{I}_{2(-1)}(b) = -(\underline{I}_{20}(b) + \underline{U}_{2(-1)}(b) j\omega C_2), \quad (5.40)$$

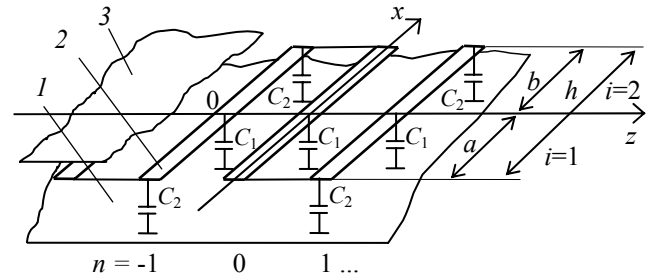
$$\underline{U}_{20}(0) = \underline{U}_{10}(0), \quad (5.41)$$

$$\underline{I}_{20}(0) = \underline{I}_{10}(0) + \underline{U}_{20}(0) j\omega C_1, \quad (5.42)$$

$$\underline{U}_{10}(-a) = \underline{U}_{11}(-a), \quad (5.43)$$

$$\underline{I}_{10}(-a) = -(\underline{I}_{11}(-a) + \underline{U}_{10}(-a) j\omega C_2). \quad (5.44)$$

Įrašę į (5.37)–(5.44) įtampų ir srovių išraiškas gauname lygčių sistemą, kurią sprendami galime rasti sistemos dispersinę lygtį. Kai $a = b$, dispersinė lygtis yra tokio pavidalo:



5.9 pav. Meandrinės sistemos modelis:

1, 3 – ekranai, 2 – daugialaidės linijos laidininkas, modeliuojantis meandro juostelę

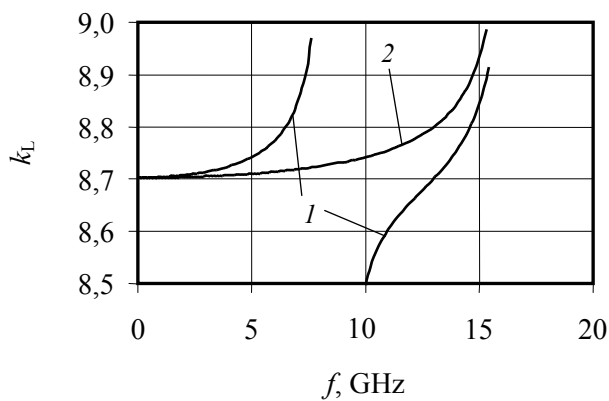
$$Y(\theta) \tan ka \cot \frac{\theta}{2} - Y(\theta + \pi) \cot ka \tan \frac{\theta}{2} + \frac{\omega C_1}{2Y(\theta)} (Y(\theta) \cot \frac{\theta}{2} + Y(\theta + \pi) \tan \frac{\theta}{2}) + \frac{\omega C_2}{\sin \theta} (1 - \frac{\omega C_1}{2Y(\theta)} \tan ka) = 0. \quad (5.45)$$

Bangos skaičių k , lėtinimo koeficientą k_L , dažnį f skaičiuojame taip pat, kaip ir spiralinės sistemos atveju. Meandrinės sistemos įėjimo varža išreiškiama formule:

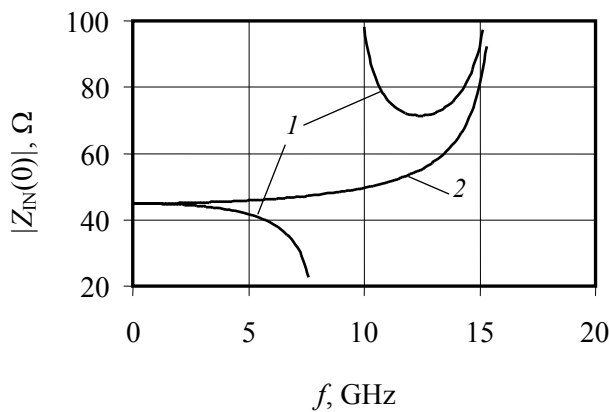
$$\underline{Z}_{IN}(x) = \frac{\underline{U}_{in}(x)}{\underline{I}_{in}(x)}. \quad (5.46)$$

Ji apskritai priklauso nuo n ir x .

5.2.3 Skaičiavimo rezultatai ir jų analizė



a



b

5.10 pav. Spiralinės lėtinimo sistemos lėtinimo koeficiento (a) ir įėjimo varžos (b) priklausomybės nuo dažnio, kai $a = b = 8$ mm, $L = 2$ mm, $l = 0,5$ mm, $p = 0,4$ mm, $w_1 = w_2 = 0,5$ mm:
1 – $C_1 = 0$, $C_2 = 0,2$ pF;
2 – $C_1 = C_2 = 0,1$ pF

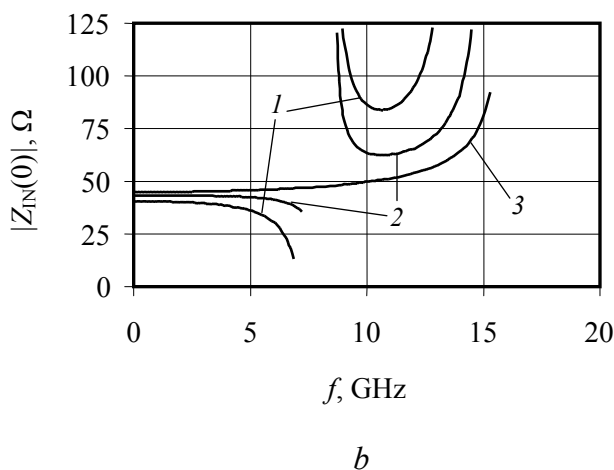
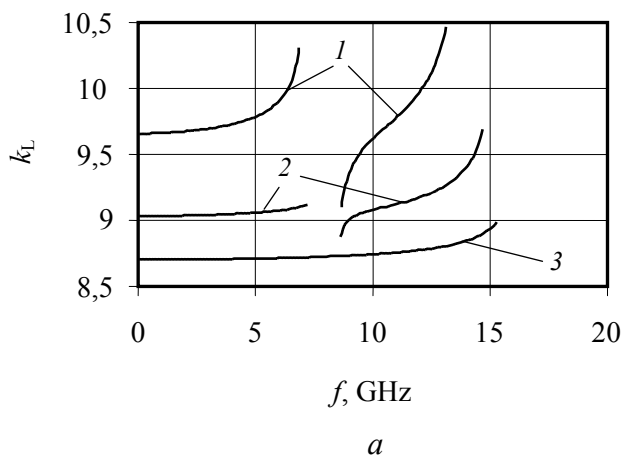
Daugialaidžių linijų banginiai laidumai priklauso nuo fazės kampo θ ir yra skaičiuojami įvairiais metodais [50]. Šiame skyriuje banginiai laidumai buvo skaičiuojami baigtinių skirtumų metodu [176].

Bangos skaičiaus vertę, ties kuria spiralinės ir meandrinės lėtinimo ir kreipimo sistemų lygčių sistemų determinantai lygūs nuliui arba tenkinamos dispersinės lygtys (5.31) ir (5.45), galime rasti priartėjimo būdu, taikydami ankstesniuose skyriuose taikytus algoritmus, aptartus [4, 6, 26, 44] ir kituose darbuose. Šiame skyriuje bangos skaičiaus reikšmės apskaičiuotos neišvedant dispersinės lygties.

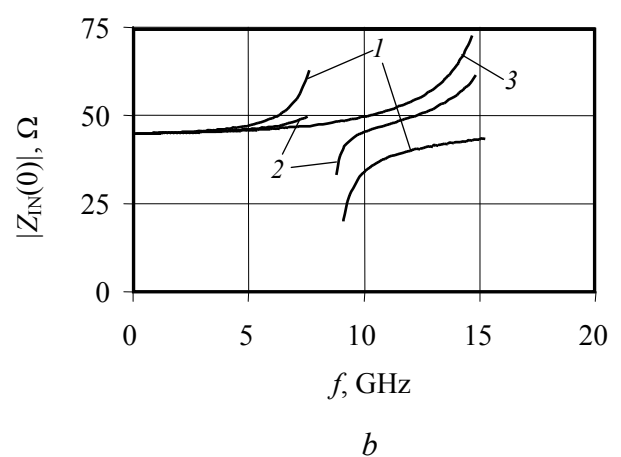
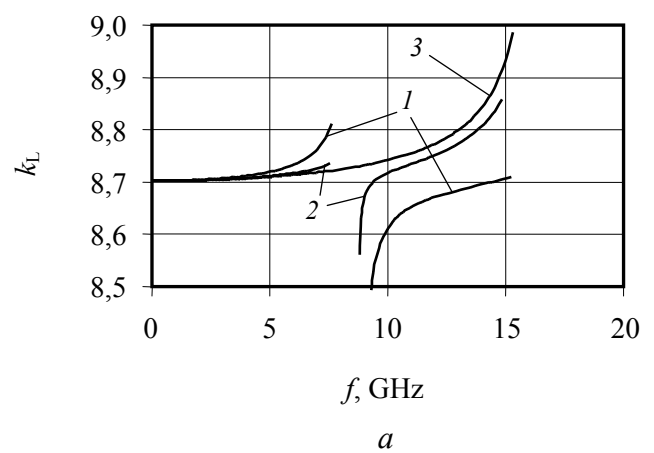
5.10 paveiksle, a, b, pavaizduotos spiralinės lėtinimo ir kreipimo sistemos lėtinimo koeficiento ir įėjimo varžos priklausomybės nuo dažnio, kai dėl laikiklių atsirandanti ir vijai tenkanti talpa yra $C_1 + C_2 = 0,2$ pF. Kreivės 1 gautos, kai talpa sutelkta vienoje vijos vietoje ($C_1 = 0$, $C_2 = 0,2$ pF). Kreivės 2 iliustruoja, kaip pasikeičia sistemos charakteristikos, kai

talpos vienodos ($C_1 = C_2$) ir atstumai tarp jų lygūs ($a = b = h/2$). Lygindami grafikus matome, kad yra galimybė perstumti atsirandančią dėl periodinių netolygumų užtvarinę juostą į beveik dvigubai aukštesnių dažnių sritį. Skaičiavimų rezultatai rodo, kad ši galimybė išlieka ir tada, kai vijai tenkanti talpa didesnė ($C_1 = C_2 = 0,2$ pF), bet $a = b = h/2$.

5.11 paveikslo kreivės iliustruoja, kaip spiralinės lėtinimo ir kreipimo sistemos charakteristikos priklauso nuo talpų C_2 ir C_1 santykio, kai talpa $C_1 = 0,1$ pF yra pastovi ir $a = b = h/2$. Lygindami kreives, matome, kad didėjant parazitinei talpai, kuri tenka spiralės vijai, padidėja lėtinimo koeficientas ir sumažėja įėjimo varža žemųjų dažnių srityje. Kuo didesnis talpų C_2/C_1 santykis, tuo labiau kinta lėtinimo koeficientas, įėjimo varža ir gaunama platesnė užtvarinė juosta ties $\theta \cong \pi$. Užtvarinės juostos ties $\theta \cong \pi$ nėra tik tada, kai talpos vienodos ($C_1 = C_2$).



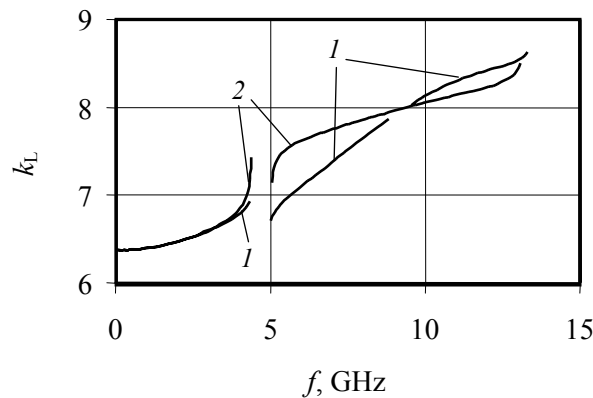
5.11 pav. Spiralinės lėtinimo sistemos lėtinimo koeficiento (a) ir įėjimo varžos (b) priklausomybės nuo dažnio, kai $a = b = 8$ mm, $L = 2$ mm, $l = 0,5$ mm, $p = 0,4$ mm, $w_1 = w_2 = 0,5$ mm, $C_1 = 0,1$ pF:
 1 – $C_2/C_1 = 4$;
 2 – $C_2/C_1 = 2$;
 3 – $C_2/C_1 = 1$



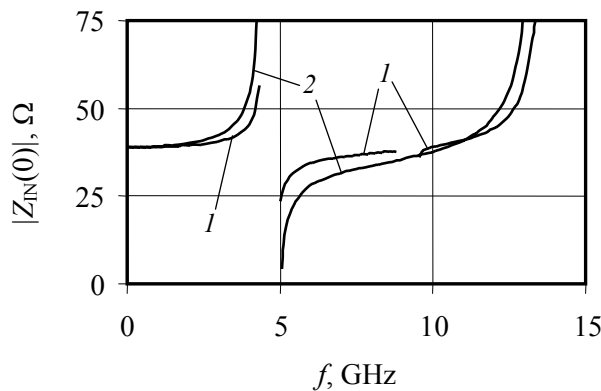
5.12 pav. Spiralinės lėtinimo sistemos lėtinimo koeficiento (a) ir įėjimo varžos (b) priklausomybės nuo dažnio, kai $C_1 = C_2 = 0,1$ pF, $h = 16$ mm = const., $L = 2$ mm, $l = 0,5$ mm, $p = 0,4$ mm, $w_1 = w_2 = 0,5$ mm:
 1 – $a/b = 3$;
 2 – $a/b = 1,5$;
 3 – $a/b = 1$

5.12 paveiksle atvaizduotos spiralinės sistemos charakteristikos, kai vijos ilgis pastovus ($a + b = h = 16$ mm), tačiau skirtingas atkarpų a ir b santykis. Iš kreivių palyginimo seka, kad sistemos lėtinimo koeficientas, įėjimo varža aukštųjų dažnių srityje ir užtvarinės juostos plotis labai priklauso nuo santykio a/b . Užtvarinės juostos ties $\theta \cong \pi$ įmanoma išvengti, kai nuotolis tarp vienodų talpinio pobūdžio netolygumų (dviejų vienodų vijos dielektrinių laikiklių) vienodas ($a = b$) ir netolygumų periodas išilgai vijos mažesnis.

Panašiai buvo tirta meandrinė lėtinimo ir kreipimo sistema. 5.13 paveiksle pavaizduotos meandrinės lėtinimo ir kreipimo sistemos lėtinimo koeficiento ir įėjimo varžos modulio priklausomybės nuo dažnio, kai vienodi atstumai ($a = b$) tarp talpų $C_1 = C_2 = 0,1$ pF (1 kreivė) ir kai $C_1 = 0$, o $C_2 = 0,2$ pF (2 kreivė). Iš šių grafikų matome, kad bendru atveju gaunami meandrinės sistemos charakteristikų trūkiai ties $\theta \cong \pi/2$ ir $\theta \cong \pi$. Kai $C_1 = 0$, charakteristikų trūkių ties fazės



a

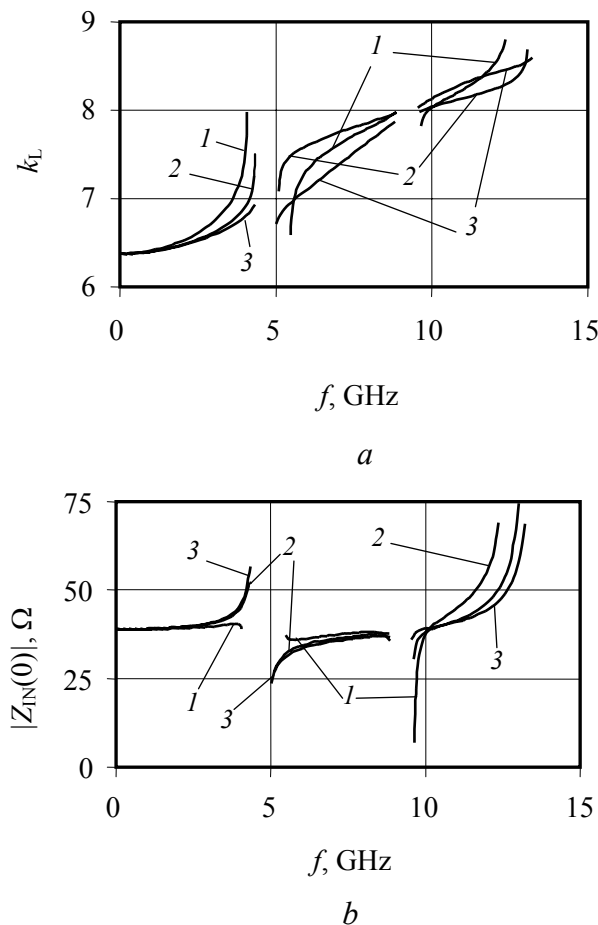


b

5.13 pav. Meandrinės lėtinimo sistemos lėtinimo koeficiento (a) ir įėjimo varžos (b) priklausomybės nuo dažnio, kai $a = b = 8$ mm, $L = 2$ mm, $l = 0,5$ mm, $p = 0,4$ mm, $w_1 = w_2 = 0,5$ mm:
1 – $C_1 = C_2 = 0,1$ pF;
2 – $C_1 = 0$, $C_2 = 0,2$ pF

kampu $\theta \cong \pi$ nėra (2 kreivės). Analogiškos charakteristikos gaunamos, kai $C_1 = 0,2$ pF, o $C_2 = 0$. Taigi meandrinės sistemos atveju, sumažinus nuotolį tarp dielektrinių laikiklių modeliuojančių talpų, užtvarinės juostos negalima nukelti į dvigubai didesnių dažnių ruožą, kaip spiralinės lėtinimo ir kreipimo sistemos atveju, tačiau galima išvengti charakteristikų trūkio ties fazės kampu $\theta \cong \pi$, jei viena iš talpų C_1 arba C_2 lygi nuliui.

5.14 paveikslo kreivės parodo, kaip meandrinės lėtinimo ir kreipimo sistemos charakteristikos priklauso nuo talpų C_2 ir C_1 santykio, kai talpa $C_1 = 0,1$ pF yra pastovi ir $a = b = h/2$. Lygindami kreives, matome, kad didėjant parazitinių talpų C_2/C_1 santykiui ir talpinio pobūdžio netolygumams, labiau kinta lėtinimo koeficientas, įėjimo varža ir gaunamos platesnės užtvarinės juostos ties $\theta \cong \pi/2$ ir $\theta \cong \pi$. Panašūs rezultatai gaunami ir didinant meandrinės lėtinimo ir kreipimo sistemos



5.14 pav. Meandrinės lėtinimo sistemos lėtinimo koeficiento (a) ir įėjimo varžos (b) priklausomybės nuo dažnio, kai $a = b = 8$ mm, $L = 2$ mm, $l = 0,5$ mm, $p = 0,4$ mm, $w_1 = w_2 = 0,5$ mm, $C_1 = 0,1$ pF = const.:
 1 – $C_2 / C_1 = 4$;
 2 – $C_2 / C_1 = 2$;
 3 – $C_2 / C_1 = 1$

laidininko atkarpų ilgių santykį a/b arba b/a , kai $C_1 = C_2$.

Taigi talpinio pobūdžio netolygumų, atsirandančių dėl meandrinio elektrodo dielektrinių laikiklių, įtaka meandrinų sistemų charakteristikoms skiriasi nuo jų įtakos spiralinių sistemų charakteristikoms.

Meandrinų sistemų su periodiniais netolygumais praleidžiamųjų dažnių juostos plotį ir užtvarinės juostos vietą dažnių ašyje lemia meandrinio laidininko ilgis $2h$ sistemos periode. Pirmoji užtvarinė juosta yra žemesnių dažnių ruože (ne ties $\theta \cong \pi$, kaip spiralinių sistemų atveju, o ties $\theta \cong \pi/2$). Panašios nevienalyčių meandrinų sistemų savybės buvo pastebėtos [26], nagrinėjant periodines meandrinės sistemas su nevienodo pločio gretimomis juostelėmis.

Mažinant nuotolį tarp meandrinio elektrodo dielektrinius laikiklius modeliuojančių talpų, užtvarinės juostos ties $\theta \cong \pi/2$ nepavyksta išvengti. Specifinės meandrinų sistemų savybės lemia tai, kad jų periodas yra

$2L$ ir jose sklindančios bangos yra dviejų bangų superpozicija [26].

5.3 Lėtinimo ir kreipimo sistemų ir jų jungių modeliavimas bei tobulinimas

5.3.1 Signalinio trakto modelis

Sakykime, kad bėgančiosios bangos elektroninio vamzdžio signaliniame trakte yra spiralinė lėtinimo ir kreipimo sistema, kurios išvadai yra juostelinės linijos atkarpos. Tokio trakto fragmentas atvaizduotas 5.15 paveiksle. 5.16 paveikslas, a, vaizduoja daugialaidės linijos, modeliuojančios spiralinę lėtinimo ir kreipimo sistemą, pjūvio fragmentą. 5.16 paveiksle, b, pateiktas juostelinės linijos pjūvio vaizdas. Pagaliau 5.16 paveiksle, c, atvaizduotas daugialaidės linijos, modeliuojančios spiralės galines vijas, pjūvio fragmentas.

Spiralinės sistemos, modeliuojamos vieneile daugialaide linija (5.16 pav., a), banginė varža, kaip žinoma [6, 44, 50], išreiškiama formule

$$Z(\theta) = 1/Y(\theta), \quad (5.46)$$

$$Y(\theta) = Y(0) + [Y(\pi) - Y(0)] \sin^2(\theta/2); \quad (5.47)$$

čia θ – fazės kampas tarp gretimų daugialaidės linijos laidininkų (spiralės vijų) įtampų arba srovių; Y – banginis laidumas.

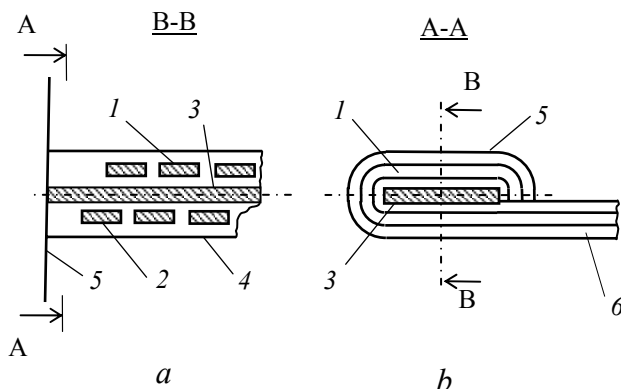
Banginius laidumus $Y(0)$, $Y(\pi)$, juostelinės linijos banginį laidumą Y_L ir jos banginę varžą $Z_L = 1/Y_L$ galima pakankamai tiksliai apskaičiuoti taikant baigtinių skirtumų arba baigtinių elementų metodus. Spiralės galinės vijos banginį laidumą galime rasti jos kairiąją pusę nagrinėdami kaip juostelinės linijos dalį, o dešiniąją pusę – kaip pusę periodo daugialaidės linijos, modeliuojančios spiralinę sistemą. Tada linijos atkarpos, modeliuojančios galinę viją, banginė varža ir banginis laidumas išreiškiami formulėmis

$$Z_V(\theta) = 1/Y_V(\theta), \quad (5.48)$$

$$Y_V(\theta) = Y_L^V/2 + Y^V/2; \quad (5.49)$$

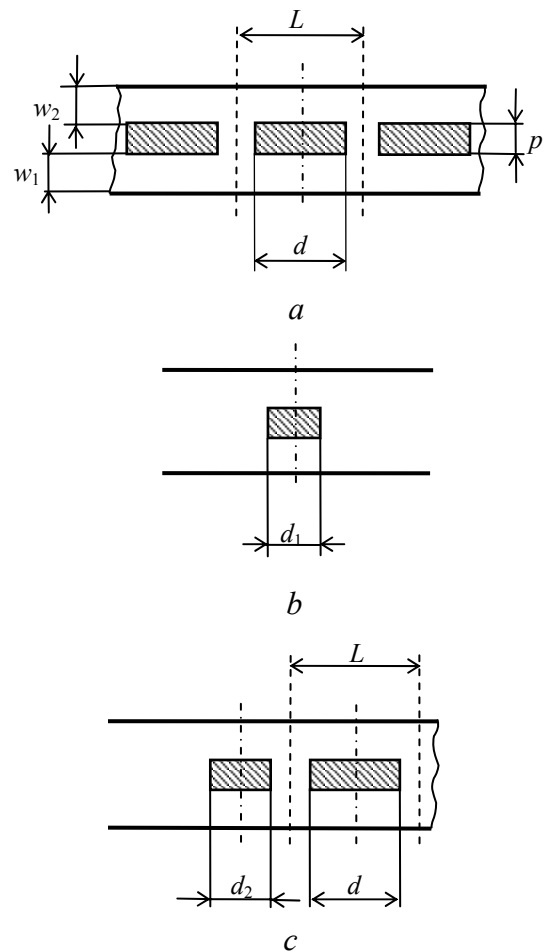
čia Y_L^V ir Y^V – juostelinės linijos ir vieneilės daugialaidės linijos banginiai laidumai, kai centrinio laidininko plotis d_2 toks kaip galinės vijos (5.16 pav., c).

Siekdami, kad vaizdžiau atsiskleistų reiškiniai lėtinimo ir kreipimo sistemos jungėse, nagrinėkime padidintos (100Ω) banginės varžos

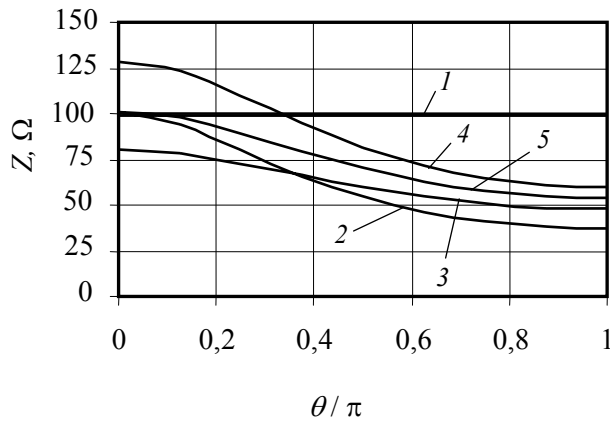


5.15 pav. Spiralinės sistemos išilginio (a) ir skersinio (b) pjūvių fragmentai:

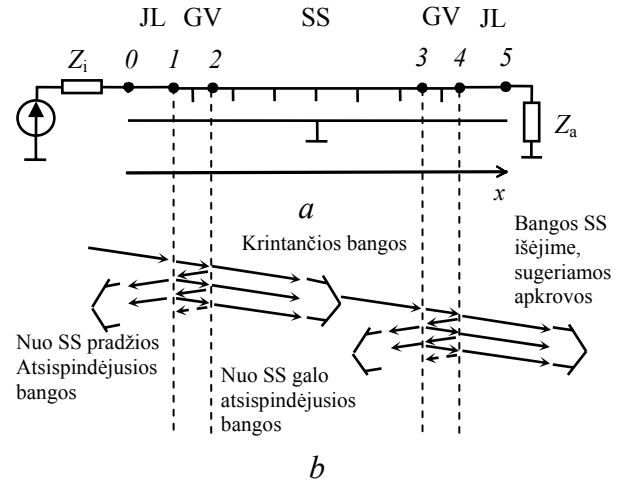
1 – spiralė; 2 – jos galinė vija; 3 – vidinis ekranas; 4 – išorinis ekranas; 5 – diafragma; 6 – juostelinė linija



5.16 pav. Linijų atkarpų, modeliuojančių bėgančiosios bangos elektroninio vamzdžio signalinio trakto atkarpas, skersiniai pjūviai



5.17 pav. Signalinio trakto elementų banginių varžų priklausomybės nuo fazės kampo θ :
 1 – juostelinė linija; 2 – spiralinė sistema;
 3, 4, 5 – galinė vija, kai $d_2 = 1,5; 0,6; 1,0$ mm



5.18 pav. Signalinio trakto modelis (a) ir daugkartinių atspindžių diagrama (b):
 JL – juostelinės linijos atkarpa; SS – spiralinė sistema; GV – galinė spiralės vija

trakta, kuriame panaudota iš palyginti storo

laidininko padaryta spiralė – tuomet spiralės galuose susidaro didesnė elektrinio lauko sklaida.

Duomenys apie spiralinės sistemos, juostelinės linijos ir galinių vijų bangines varžas, kai $w_1 = 1$ mm, $w_2 = 1,07$ mm, $p = 0,5$ mm, pateikti 5.1 lentelėje. Skaičiuojant spiralinės sistemos bangines varžas, tariama, kad $L = 2$ mm, $d = 1,5$ mm. Nagrinėti trys galinių vijų variantai: pirmas, kai galinės vijos plotis toks pat kaip kitų spiralės vijų plotis (galinės vijos nesusiaurintos); antras, kai galinės vijos plotis toks pat kaip juostelinės linijos centrinio laidininko plotis; trečias, kai galinės vijos plotis toks, kad šią viją atitinkančios ilgosios linijos banginė varža žemųjų dažnių srityje artima 100Ω .

5.17 paveiksle pateiktos signalinio trakto elementų banginių varžų priklausomybės nuo fazės kampo θ . Šios priklausomybės iš esmės yra apibendrintos banginių varžų priklausomybės nuo dažnio. Kai elektronų pluoštui kreipti panaudota spiralė, ekranuota vidiniu ir išoriniu ekranais, jos lėtinimo koeficientas apytikriai lygus konstrukciniam lėtinimo koeficientui ($k_{Lk} \cong h/L$; čia h – vijos ilgis) ir fazės kampą θ su dažniu f sieja priklausomybė

$$\theta = 2\pi f \tau_v \cong 2\pi f \cdot (h/c_0) = 2\pi f \cdot (k_{Lk} L/c_0); \quad (5.50)$$

5.1 lentelė. Signalinio trakto elementų banginės varžos

Signalinio trakto elementas	Laidininko plotis (d, d_1, d_2), mm	$Z(0), \Omega$	$Z(\pi), \Omega$
Spiralinė sistema	1,5	100,6	37,3
Juostelinė linija	0,6	99,1	99,1
Galinė vija	1,5	80	47,7
Galinė vija	0,6	129	59,6
Galinė vija	1	101	53,6

čia τ_v – vėlinimo trukmė vijoje; c_0 – šviesos greitis vakuume.

Atsižvelgdami į signalinio trakto sandarą, galime taikyti jo modelį, atvaizduotą 5.18 paveiksle, *a*. Tada, kaip ir [6, 44], pasinaudodami daugkartinių atspindžių diagrama, galime rasti atspindžio koeficientų ir perdavimo funkcijų išraiškas, apibūdinančias tiriamųjų signalų dažninius išskraipymus.

Atsižvelgdami į atspindžius nuo trakto netolygumų lėtinimo ir kreipimo sistemos pradžioje (trakto taškų 1 ir 2, tarp kurių vėlinimo trukmė t_{12}), gauname tokią atspindžio koeficiento išraišką:

$$\underline{p}_{12} = p_1 + p_2(1 - p_1^2) \exp(-j2\omega t_{12}) / v_{12}. \quad (5.51)$$

Įtampos dažninius išskraipymus dėl atspindžių nuo spiralės vijos sistemos pradžioje aprašo perdavimo funkcija

$$\underline{K}_{IN0} = \underline{K}_{12\Sigma} = (1 + p_1)(1 + p_2) / v_{12}. \quad (5.52)$$

Atsižvelgiant į nuo sistemos galo atsispindėjusius virpesius, perdavimo funkcijos, apibūdinančios signalų dažninius išskraipymus sistemos įėjime, išraiška tampa tokia:

$$\underline{K}_{IN\Sigma} \cong \underline{K}_{IN0}(1 + \underline{p}_{340} \underline{p}_{210} \exp(-j2\omega t_{23})); \quad (5.53)$$

čia t_{23} – vėlinimo trukmė lėtinimo ir kreipimo sistemoje (tarp 2 ir 3 taškų); $\underline{p}_{340}$ – atspindžio nuo sistemos galo koeficientas (trakto taškų 3 ir 4, tarp kurių vėlinimo trukmė t_{34}), išreiškiamas formule:

$$\underline{p}_{340} = p_3 + p_4(1 - p_3^2) \exp(-j2\omega t_{34}) / v_{34}, \quad (5.54)$$

o $\underline{p}_{210}$ – nuo sistemos pradžios atsispindėjusios bangos atspindžio koeficientas:

$$\underline{p}_{210} = -p_2 - p_1(1 - p_2^2) \exp(-j2\omega t_{12}) / v_{12}. \quad (5.55)$$

Atsižvelgdami tik į krintančiąją lėtinimo ir kreipimo sistemoje įtampos bangą, gauname tokią perdavimo funkcijos, apibūdinančios įtampą sistemos gale (apkrovoje) išraišką:

$$\underline{K}_{IS0} = \underline{K}_{12\Sigma} \underline{K}_{34\Sigma}; \quad (5.56)$$

čia perdavimo funkcija $\underline{K}_{34\Sigma}$ apibūdina dažninius išskraipymus dėl netolygumų sistemos gale ir išreiškiama formule:

$$\underline{K}_{34\Sigma} = (1 + p_3)(1 + p_4) / v_{34}. \quad (5.57)$$

Atsižvelgiant į atsispindėjusius nuo sistemos galo virpesius, perdavimo funkcijos, apibūdinančios įtampą sistemos gale, išraiška tampa tokia:

$$\underline{K}_{IS\Sigma} \cong \underline{K}_{IN\Sigma} \underline{K}_{34\Sigma}. \quad (5.58)$$

Kiti (5.51) – (5.58) įrašyti ir dar neaptarti dydžiai išreiškiami formulėmis:

$$p_1 = (Z_{BV}(\theta) - Z_{BL}) / (Z_{BV}(\theta) + Z_{BL}); \quad (5.59)$$

$$p_2 = (Z_B(\theta) - Z_{BV}(\theta)) / (Z_B(\theta) + Z_{BV}(\theta)); \quad (5.60)$$

$$p_3 = (Z_{BV}(\theta) - Z_B(\theta)) / (Z_{BV}(\theta) + Z_B(\theta)) = -p_2; \quad (5.61)$$

$$p_4 = (Z_{BL} - Z_{BV}(\theta)) / (Z_{BL} + Z_{BV}(\theta)) = -p_1; \quad (5.62)$$

$$\nu_{12} = 1 + p_1 p_2 \exp(-j2\omega t_{12}); \quad (5.63)$$

$$\nu_{34} = 1 + p_3 p_4 \exp(-j2\omega t_{34}). \quad (5.64)$$

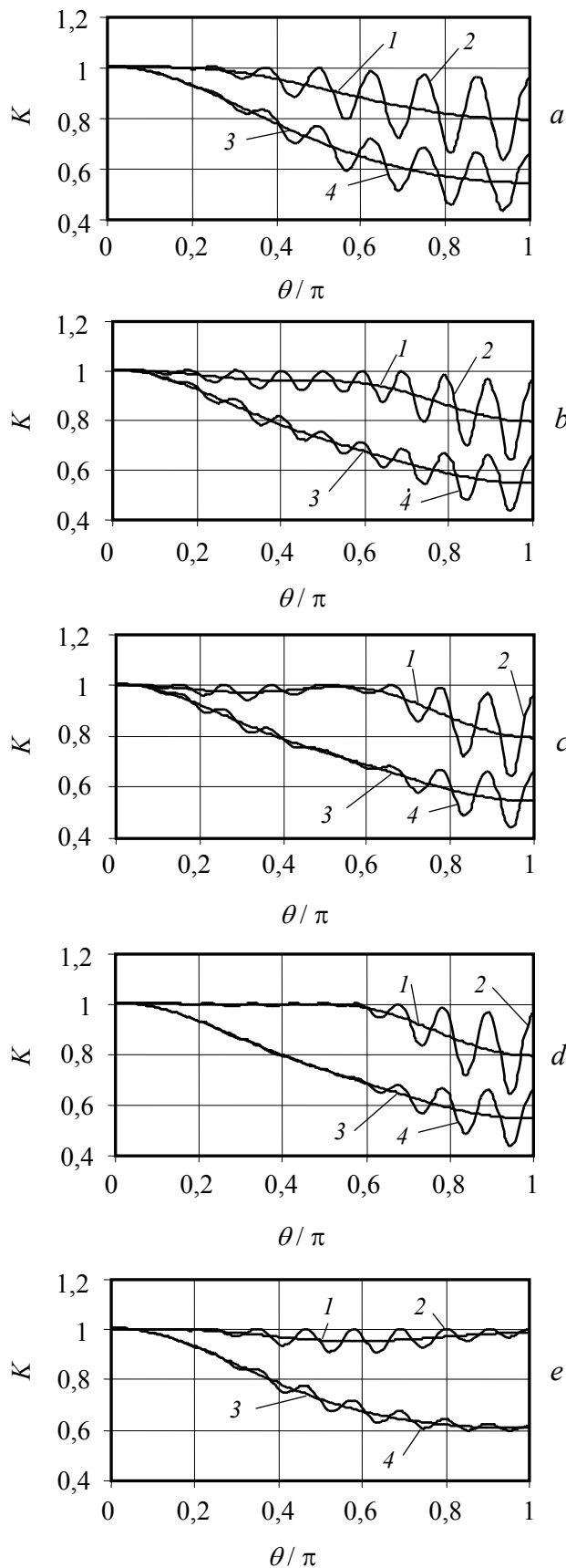
Taikydami (5.51) – (5.64) ir siekdami atskleisti lėtinimo ir kreipimo sistemos jungių įtaką elektroninio vamzdžio dažninėms ir pereinamosioms charakteristikoms, laikėme, kad signalų šaltinis ir apkrova (5.18 pav., *a*) suderinti su juostelinėmis linijomis, t.y. $Z_i = Z_{BL}$ ir $Z_a = Z_{BL}$.

5.3.2 Skaičiavimų rezultatai ir jų analizė

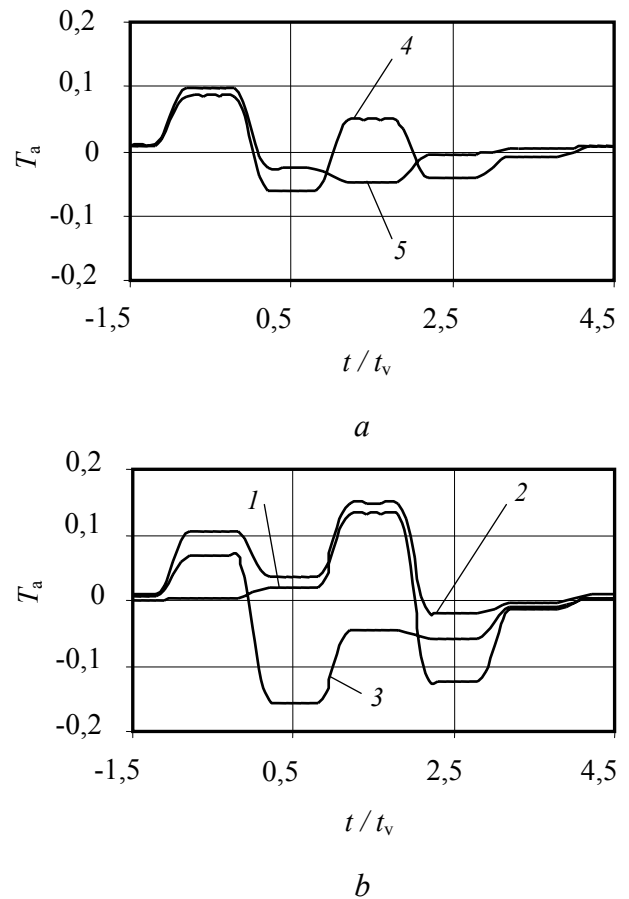
5.19 paveiksle, *a* – *e*, pateiktos amplitudės dažninės charakteristikos, apibūdinančios dažninius iškraipymus signaliniame trakte ir bėgančiosios bangos elektroniniame vamzdyje. 1 ir 2 kreivės apskaičiuotos taikant (5.56) ir (5.58) formules, 3 ir 4 kreivės – taikant (5.52) ir (5.53) formules. Taigi skaičiuojant 1 ir 3 charakteristikas taikytos (5.52) ir (5.56) formulės – nevertinti pakartotiniai atspindžiai nuo spiralinės lėtinimo ir kreipimo sistemos galų. Virpamąjį 2 ir 4 kreivių pobūdį lemia pakartotiniai atspindžiai.

Apskaičiuojant 5.19 paveikslo, *a*, charakteristikas, padaryta prielaida, kad galinės lėtinimo ir kreipimo sistemos vijos nesukelia netolygumų ($Z_V(\theta) = Z_L$). 5.19 paveikslo, *b* – *d*, charakteristikos gautos, kai $\omega t_{12} = \omega t_{34} = \theta$ ir galinių vijų laidininkų plotis d_2 yra atitinkamai 1,5, 0,6 ir 1 mm. Apskaičiuojant 5.19 paveikslo, *e*, charakteristikas laikoma, kad $d_2 = 1$ mm, tačiau galinių vijų nevienalyčių dalių ilgis dvigubai mažesnis ($\omega t_{12} = \omega t_{34} = \theta/2$) negu skaičiuojant 5.19 paveikslo, *c*, charakteristikas.

Lyginant 5.19 paveikslo charakteristikas matyti, kad signalinio trakto amplitudės dažninės charakteristikos (1 ir 2 kreivės) labai priklauso nuo galinių vijų. Kai $d_2 = 1$ mm ir galinių vijų banginės varžos žemųjų dažnių srityje suderintos su signaliniu traktu, perdavimo koeficientų $\underline{K}_{IS0}$ ir $\underline{K}_{IS\pi}$ moduliai praktiškai lygūs 1 plačiame dažnių ruože (kai $\theta/\pi \leq 0,6$). Tai įmanoma todėl, kad ties $\theta/\pi = 0,5$ susiaurintos galinės vijos veikia kaip ketvirčio bangos ilgio suderinimo transformatoriai. Šią mintį patvirtina 5.19 paveikslo, *e*, kreivės: kai $\omega t_{12} = \omega t_{34} = \theta/2$, trakto, kuriame įjungta spiralinė sistema, kurios banginė varža ties $\theta = \pi$ tampa beveik 3 kartus mažesnė nei trakto nominali varža, amplitudės dažninės charakteristikos netolygumas neviršija 10%. Šis



5.19 pav. Amplitudės dažninės charakteristikos, apibūdinančios signalų dažninius iškreipimus signaliniame trakte (1, 2 kreivės) ir bėgančiosios bangos elektroniniame vamzdyje (3, 4 kreivės)



5.20 pav. Atspindėję virpesiai:

1 – $Z_v(\theta) = Z_L$;

2 – $\omega t_{12} = \omega t_{34} = \theta$, $d_2 = 1,5$ mm;

3 – $\omega t_{12} = \omega t_{34} = \theta$, $d_2 = 0,6$ mm;

4 – $\omega t_{12} = \omega t_{34} = \theta$, $d_2 = 1$ mm;

5 – $\omega t_{12} = \omega t_{34} = \theta/2$, $d_2 = 1$ mm

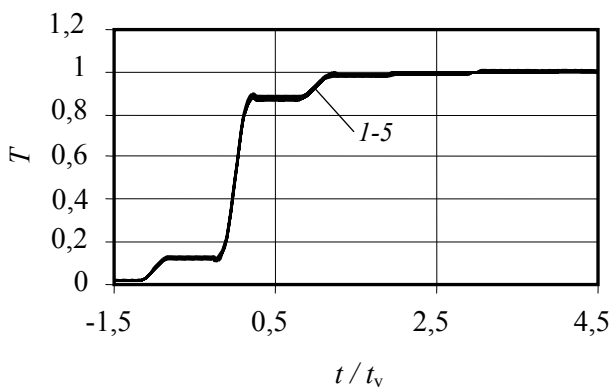
efektas buvo pastebėtas [159]. Jį galime paaiškinti tuo, kad aptariamomis sąlygomis galinės susiaurintos vijos atlieka ketvirčio bangos ilgio suderinimo transformatoriaus vaidmenį, kai $\theta = \pi$.

5.20 paveiksle pateiktos virpesių, atspindėjusių nuo lėtinimo ir kreipimo sistemos pradžios, kai traktas zonduojamas vienetiniu įtampos šuoliu, laikinės diagramos. Jas skaičiuojant panaudota atspindžio koeficiento išraiška (5.51) ir žinomas sąryšis tarp pereinamosios charakteristikos ir perdavimo

funkcijos. Siekiant išvengti laikinių charakteristikų osciliacijų dėl baigtinio viršutinio integravimo režio, į pointegralinį reiškinį, kaip ir [6], buvo įtrauktas Bernšteino ir Rogozinskio daugiklis.

5.20 paveikslo, a, b , kreivės apskaičiuotos tiems patiems signalinio trakto atvejams, kaip ir 5.19 paveikslo amplitudės dažninės charakteristikos. Jos vaizdžiai patvirtina eksperimentinių tyrimų [6] išvadą, kad susiaurinus galines lėtinimo ir kreipimo sistemos vijas įmanoma sumažinti atspindėjusių virpesių lygį. Minimalūs atspindžiai gaunami (5 kreivė), kai trakto nevienalyčių atkarpų (jungių) ilgiai lėtinimo ir kreipimo sistemos galuose lygūs pusei vijos ilgio ir tos atkarpos veikia kaip ketvirčio bangos suderinimo transformatorius, kai $\theta = \pi$.

Deja, elektronų pluoštą bėgančiosios bangos elektroniniuose vamzdžiuose efektyviausiai kreipia bangos, kurios sklinda ta pačia kryptimi ir tuo pačiu greičiu kaip elektronų pluošto elektronai. Kai nevertiname slopinimo lėtinimo ir kreipimo sistemoje, krintančiųjų bangų amplitudės sistemoje nekinta – išlieka tokios pat kaip šių bangų amplitudės sistemos pradžioje. Taigi tiriamųjų signalų formos dažninius iškraipymus apibūdina perdavimo funkcijų $\underline{K}_{IN0}$ ir $\underline{K}_{IN\Sigma}$ moduliai – amplitudės dažninės charakteristikos, atvaizduotos 5.19 paveiksle, $a - e$, 3 ir 4 kreivėmis. Palyginus grafikus matyti, kad bėgančiosios bangos elektroninio vamzdžio amplitudės dažninės charakteristikos vidutinis lygis praktiškai nepriklauso nuo lėtinimo ir kreipimo sistemos jungių konstrukcijos. Todėl nuo jungių konstrukcijos, galima sakyti, nepriklauso ir perdavimo funkciją $\underline{K}_{IN0}$ atitinkančios pereinamosios charakteristikos forma, ir kilimo trukmė (5.21 pav.). Dar mažiau jungių įtaka pastebima atsižvelgus į lėkio reiškinį, kurio įtaka įvertinama perdavimo funkcija [6, 44]



5.21 pav. Perdavimo funkciją $\underline{K}_{IN0}$ atitinkančios pereinamosios charakteristikos:

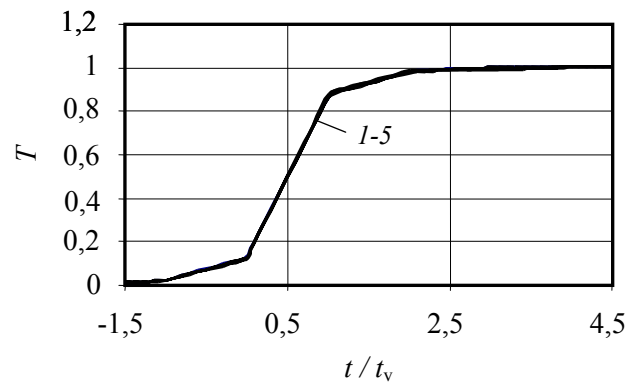
$$1 - Z_V(\theta) = Z_L;$$

$$2 - \omega t_{12} = \omega t_{34} = \theta, d_2 = 1,5 \text{ mm};$$

$$3 - \omega t_{12} = \omega t_{34} = \theta, d_2 = 0,6 \text{ mm};$$

$$4 - \omega t_{12} = \omega t_{34} = \theta, d_2 = 1 \text{ mm};$$

$$5 - \omega t_{12} = \omega t_{34} = \theta/2, d_2 = 1 \text{ mm}$$



5.22 pav. Perdavimo funkciją $K_{EV} = \underline{K}_{IN0} K_t$ atitinkančios pereinamosios charakteristikos:

$$1 - Z_V(\theta) = Z_L;$$

$$2 - \omega t_{12} = \omega t_{34} = \theta, d_2 = 1,5 \text{ mm};$$

$$3 - \omega t_{12} = \omega t_{34} = \theta, d_2 = 0,6 \text{ mm};$$

$$4 - \omega t_{12} = \omega t_{34} = \theta, d_2 = 1 \text{ mm};$$

$$5 - \omega t_{12} = \omega t_{34} = \theta/2, d_2 = 1 \text{ mm}$$

$$\underline{K}_t = \frac{\sin x}{x} e^{-jx}; \quad (5.65)$$

čia $x \cong \omega \tau_v / 2$.

Pastarąją mintį iliustruoja bėgančiosios bangos elektroninio vamzdžio pereinamosios charakteristikos, apskaičiuotos įvertinant jungių ir lėkio efekto įtaką, atvaizduotos 5.22 paveiksle.

Kita vertus, reikia pripažinti, kad parinkus optimalų galinių vijų plotį, įmanoma sumažinti perdavimo funkcijos $\underline{K}_{\text{INS}}$ virpėjimą (5.19 paveikslas, $a - e$, 4 kreivės), vadinasi, ir vamzdžio pereinamosios charakteristikos plokščiosios dalies netolygumą, kurį lemia virpesiai, atspindėję nuo lėtinimo ir kreipimo sistemos galo ir dar pakartotinai nuo jos pradžios.

Iš charakteristikų aptarimo išplaukia išvada, kad lėtinimo ir kreipimo sistemos jungių įtaka bėgančiosios bangos elektroninių vamzdžių charakteristikoms palyginti nedidelė. Norint sumažinti tiriamųjų signalų formos dažninius iškraipymus ir bėgančiosios bangos elektroninio vamzdžio pereinamosios charakteristikos kilimo trukmę, reikia siekti, kad lėtinimo ir kreipimo sistemos banginė varža mažiau priklausytų nuo dažnio.

5.4 Signalinių traktų ir lėtinimo ir kreipimo sistemų tobulinimas

Bėgančiosios bangos elektroninių vamzdžių lėtinimo ir kreipimo sistemoms pirmiausia keliamas elektromagnetinės bangos fazinio greičio mažos dispersijos reikalavimas [6, 44]. Šiuo požiūriu geros yra spiralinių sistemų savybės. Tačiau spiralinių sistemų banginė varža, kaip galėjome dar kartą įsitikinti, labai priklauso nuo dažnio. Dėl banginės varžos kitimo pereinamoji charakteristika, apibūdinanti įtampą, patenkančią į spiralinę lėtinimo ir kreipimo sistemą, kyla laipteliais (5.21 pav.). Remdamiesi [6] galime rasti, kad didžiausio laiptelio aukštis (kai $t \cong 0$) išreiškiamas formule:

$$B \cong \frac{4Z(\pi)}{3Z(\pi) + Z(0)}. \quad (5.66)$$

Taigi siekdami mažesnių dažnių iškraipymų ir geresnės pereinamosios charakteristikos formos ($B \rightarrow 1$), turime siekti, kad $Z(\pi)$ būtų artimesnė $Z(0)$. Banginės varžos kitimą, kaip žinoma [6, 44, 50], galima sumažinti mažinant tarpus tarp spiralės ir ekranų, didinant tarpą tarp gretimų vijų ir mažinant spiralės laidininko storį. Tačiau, mažinant tarpus tarp spiralės ir ekranų, mažėja banginė varža. Didinant tarpus tarp vijų, mažėja vamzdžio jautris.

Didėjant dažniui, mažai kinta meandrinų sistemų banginė varža [6, 26]. Paprasčiausios meandrinės sistemos atveju maksimalios (kai $\theta = 0$) ir minimalios (kai $\theta = \pi/2$) banginių varžų santykį galime išreikšti formule:

$$\frac{Z_{\max}}{Z_{\min}} = \frac{Z(0) + Z(\pi)}{2\sqrt{Z(0)Z(\pi)}}. \quad (5.67)$$

Nesunku įsitikinti, kad šis santykis daug mažesnis nei spiralinės sistemos maksimalios ir minimalios banginių varžų santykis ($Z(0)/Z(\pi)$). Kai $Z(0)/Z(\pi) \cong 3$ (kaip nagrinėtos spiralinės lėtinimo ir kreipimo sistemos atveju), meandrinės sistemos $Z_{\max}/Z_{\min} \leq 1,15$. Todėl meandrinės lėtinimo ir kreipimo sistemos atveju pereinamosios charakteristikos laipteliai prieš pereinamosios charakteristikos frontą ir už jo būtų daug mažesnio aukščio. Kadangi meandrinės sistemos minimali banginė varža gaunama, kai $\theta = \pi/2$, laiptelių žingsnis laiko ašyje būtų lygus vėlinimo trukmei meandrinės sistemos periodu – dvigubai didesnis nei spiralinės sistemos atveju (kai tokie pat laidininkų matmenys, jų žingsnis ir toks pat lėtinimo koeficientas). Dėl aptartų priežasčių, taikant meandrinės lėtinimo ir kreipimo sistemas, įmanoma gauti geresnes vamzdžių amplitudės dažnines charakteristikas. Tačiau meandrinėms sistemoms būdingas kitas esminis trūkumas – sunku gauti mažą vamzdžio pereinamosios charakteristikos kilimo trukmę dėl fazinių iškraipymų, kylančių dėl elektromagnetinės bangos fazinio vėlinimo laiko dispersijos.

Apskritai banginės varžos ir elektromagnetinės bangos greičio kitimą, didėjant dažniui, lemia elektromagnetinis ryšys tarp gretimų lėtinimo ir kreipimo sistemos vijų. Šis ryšys sumažėja, kai tarp vijų yra ekranuojančios sienelės. Tada mažiau aktualus tampa ir lėtinimo ir kreipimo sistemos sąsajos su signaliniu traktu klausimas – nėra aptartos elektrinio lauko sklaidos, nes galinių vijų aplinka nesiskiria nuo kitų vijų aplinkos.

Yra žinomos kelių tipų superplaciajuosčių bėgančiosios bangos lėtinimo ir kreipimo sistemos su ekranuojančiosiomis sienelėmis tarp vijų tipai. Viena jų grupę sudaro lovelinės spiralinės ir meandrinės sistemos. Dėl riboto ekranuojančiųjų sienelių aukščio tokiose sistemose nepavyksta visiškai išvengti ryšio tarp gretimų vijų [148]. Kitą grupę sudaro spiralinės ir meandrinės lėtinimo ir kreipimo sistemos, kuriose ekranuojančiosios sienelės jungia vidinį ir išorinį ekranus [132, 135]. Taip galima išvengti ne tik ryšio tarp vijų, bet ir rezonansinių reiškinių galuose trumpai sujungtoje ilgosios linijos atkarpoje, sudarytoje iš spiralinės sistemos vidinio ir išorinio ekranų. Tačiau tokiose lėtinimo ir kreipimo sistemose turi būti angos elektroniniam pluoštui. Dėl angų susidaro periodiniai signalinio trakto netolygumai. Tokie netolygumai turi neigiamos įtakos lėtinimo ir kreipimo sistemos charakteristikoms. Norint atskleisti ekranuojančiųjų sienelių konstrukcijos įtaką lėtinimo ir kreipimo sistemų ir elektroninių vamzdžių charakteristikoms, reikalingi papildomi tyrimai, kurie atlikti šeštame skyriuje.

5.5 Išvados

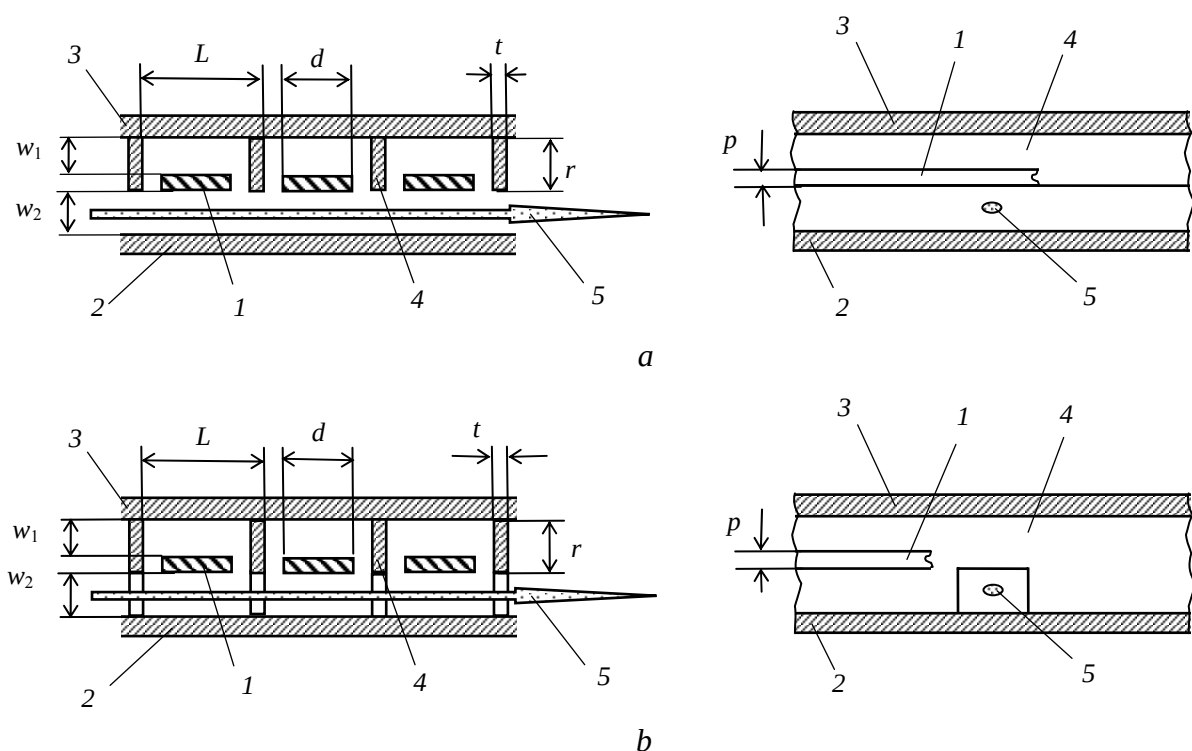
1. Spiralinės lėtinimo ir kreipimo sistemos dėl periodinio elektrinio nevienalytiškumo įgyja užtvarinių filtrų savybes kai, didėjant dažniui, fazės kampas θ tarp gretimų spiralės vijų įtampų ar srovių artėja prie π .
2. Užtvarinės juostos plotis tuo didesnis, kuo didesnis sistemos nevienalyčių dalių banginių laidumų santykis.
3. Kai yra periodinių talpinio pobūdžio netolygumų, užtvarinės juostos plotis priklauso nuo talpų santykio (C_2 / C_1) ir nuotolių tarp talpų santykio (a / b). Kai šie santykiai artėja prie 1, užtvarinės juostos plotis mažėja. Kai paminėti santykiai tampa lygūs 1, užtvarinė juosta pasislenka į beveik dvigubai aukštesnių dažnių sritį. Taigi užtvarinės juostos vietą dažnių ašyje lemia ne spiralės vijos ilgis, o vienodų vijos dalių ilgis (netolygumų periodas).
4. Talpinio pobūdžio netolygumų, atsirandančių dėl meandrinio elektrodo dielektrinių laikiklių, įtaka meandrinėms sistemų charakteristikoms skiriasi nuo jų įtakos spiralinių sistemų charakteristikoms. Pirmoji užtvarinė juosta yra žemesnių dažnių ruože (ne ties $\theta \cong \pi$, kaip spiralinių sistemų atveju, o ties $\theta \cong \pi / 2$). Mažinant nuotolį tarp meandrinio elektrodo dielektrinius laikiklius modeliuojančių talpų, užtvarinės juostos ties $\theta \cong \pi / 2$ nepavyksta išvengti. Jos vietą dažnių ašyje lemia meandrinio laidininko ilgis $2h$.
5. Nors bėgančiosios bangos lėtinimo ir kreipimo sistemų atveju dažniai, atitinkantieji $\theta = \pi$, yra už bėgančiosios bangos oscilografinių vamzdžių praleidžiamųjų dažnių juostų ribų [4, 6], į atskleistas spiralinių sistemų savybes reikia atsižvelgti kuriant ir gaminant plačiajuostes lėtinimo ir kreipimo sistemas. Vietoje vieno spiralinio elektrodo dielektrinio laikiklio verta numatyti bent du vienodus laikiklius, tarp kurių vijos atkarpos vienodos.
6. Lėtinimo ir kreipimo sistemos ir signalinio trakto jungės (susiaurintos sistemos galinės vijos) aukštųjų dažnių srityje gali veikti kaip ketvirčio bangos ilgio suderinimo transformatoriai. Kai jų banginė varža žemųjų dažnių srityje lygi signalinio trakto banginei varžai, tinkamai parinkus jungių ilgį, galima sumažinti atspindžius nuo lėtinimo ir kreipimo sistemos galų ir gauti tolygią trakto amplitudės dažninę charakteristiką, nors lėtinimo ir kreipimo sistemos banginė varža, didėjant dažniui, sumažėja net keletą kartų.
7. Norint gauti platesnę vamzdžio praleidžiamų dažnių juostą ir pereinamosios charakteristikos kilimo trukmę, reikia siekti, kad lėtinimo ir kreipimo sistemos banginė varža mažiau priklausytų nuo dažnio. Siekiant, kad, didėjant dažniui, mažai kistų elektromagnetinės bangos greitis, lėtinimo ir kreipimo sistemos banginė varža ir lengviau būtų sprendžiami sistemos sąsajos su signaliniu traktu klausimai, tarp lėtinimo ir kreipimo sistemos spiralės ar meandro vijų reikia sudaryti ekranuojančiąsias sienes.

6 skyrius

Nevienalyčių lovelinių lėtinimo ir kreipimo sistemų modelių sudarymas ir savybių analizė

Lovelinių spiralinių ir meandrinių sistemų banginė varža ir lėtinimo koeficientas yra pastovūs plačiame dažnių ruože [6, 147]. Kaip buvo minėta penktame skyriuje, jose tarp gretimų spiralės ar meandro laidininkų yra ekranuojančiosios sienelės (6.1 pav., *a*), susilpninančios elektromagnetinį ryšį tarp gretimų spiralės ar meandro laidininkų. Panaudojant ekranuojančiąsias sienelės, galima efektyviai pagerinti sistemų dažnines charakteristikas [148].

[132, 135] buvo pasiūlytos spiralinių ir meandrinių bėgančiosios bangos lėtinimo ir kreipimo sistemų konstrukcijos, kuriose ekranuojančiųjų sienelių aukštis padidintas tiek, kad šios sienelės



6.1 pav. Superplėčiamųjų lėtinimo ir kreipimo sistemų pjūvių fragmentai:

1 – spiralės arba meandro formos laidininkas; 2, 3 – ekranai; 4 – ekranuojančioji sienelė; 5 – elektronų pluoštas

jungtų apatinį ir viršutinį ekranus (6.1 pav., *b*). Nurodytuose šaltiniuose teigiama, kad taip galima išvengti ryšio tarp vijų bei rezonansinių reiškinių galuose trumpai sujungtoje ilgosios linijos atkarpoje, sudarytoje iš spiralinės sistemos vidinio ir išorinio ekranų. Tačiau tokių lėtinimo ir kreipimo sistemų ekranuojančiose sienelėse turi būti angos elektroniniam pluoštui. Dėl šių angų atsiranda periodinių signalinio trakto netolygumų ir lovelinės sistemos tampa nevienalytės.

Nesant išsamesnių žinių apie nevienalyčių lovelinių sistemų tyrimus, šiame skyriuje sudarysime šių sistemų modelius ir palyginsime nevienalyčių ir vienalyčių lovelinių spiralinių ir meandrinį sistemų charakteristikas. Papildant daugialaidžių linijų metodu gautus rezultatus nevienalytės ir vienalytės lovelinės sistemos modeliuosime ir tirsime trimačio automatizuoto projektavimo paketu *CST Microwave Studio*.

Šio skyriaus svarbiausi rezultatai paskelbti [195, 197, 198].

6.1 Nevienalyčių lovelinių lėtinimo ir kreipimo sistemų savybės

6.1.1 Spiralinės sistemos modelis

Kaip ir ankstesniuose skyriuose bei [4, 6, 44, 148], lovelinės spiralinės sistemos analizei taikysime daugialaidžių linijų metodą. Sistemos modelis atvaizduotas 6.2 paveiksle. Jį sudaro vieneilės vienpakopės nevienalytės daugialaidės linijos atkarpos ir ekranai.

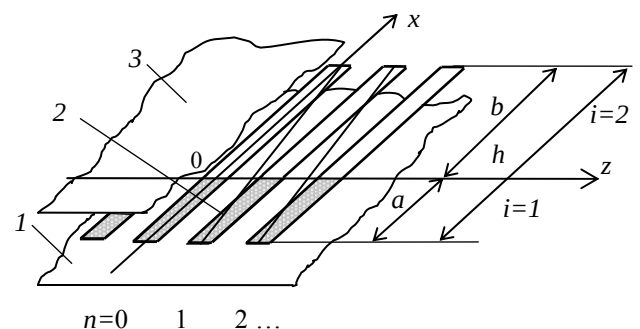
Daugialaidės linijos laidininkų potencialai ir srovės išreiškiami lygtimis [6]:

$$\underline{U}_{in}(x) = (\underline{A}_{i1} \sin kx + \underline{A}_{i2} \cos kx) e^{-jn\theta}, \quad (6.1)$$

$$\underline{I}_{in}(x) = jY_i(\theta)(\underline{A}_{i1} \cos kx - \underline{A}_{i2} \sin kx) e^{-jn\theta}; \quad (6.2)$$

čia i – srities numeris; n – laidininko numeris; $\underline{A}$ – amplitudinis koeficientas; k – bangos skaičius; θ – gretimų daugialaidės linijos laidininkų įtampų ar srovių fazių skirtumas; $Y(\theta)$ – banginis laidumas.

Nevienalytės spiralinės lovelinės sistemos su langu elektronų pluoštui (6.2 paveiksle langą atitinka tamsesnė daugialaidės linijos laidininko dalis) modelis yra analogiškas nevienalytės spiralinės sistemos modeliui, kuris nagrinėtas penktame skyriuje. Atsižvelgdami į tai, analizei pasinaudosime penktame skyriuje taikyta ir šiek tiek pertvarkyta dispersine lygtimi:



6.2 pav. Nevienalytės spiralinės sistemos modelis: 1, 3 – ekranai, 2 – daugialaidės linijos laidininkas, modeliuojantis spiralės viją

$$2 \cos \theta = 2 \cos ka \cos kb - \sin ka \sin kb \left(\frac{Y_1(\theta)}{Y_2(\theta)} + \frac{Y_2(\theta)}{Y_1(\theta)} \right). \quad (6.3)$$

Sprendžiant dispersinę lygtį (6.3), galima rasti bangos skaičių k , atitinkantį pasirinktą θ vertę. Tada galima apskaičiuoti lėtinimo koeficientą ir dažnį:

$$k_L = \theta / kL, \quad (6.4)$$

$$f = kc_0 / 2\pi; \quad (6.5)$$

čia L – spiralės vijų ir daugialaidės linijos laidininkų žingsnis; c_0 – šviesos greitis.

Žinodami koeficientų $\underline{A}_{i1}$ ir $\underline{A}_{i2}$ sąryšį, galime rasti sistemos įėjimo varžą:

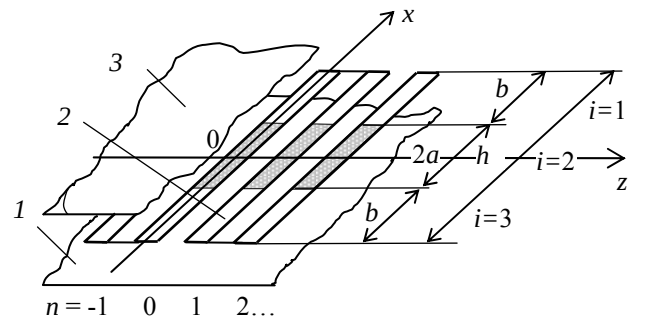
$$\underline{Z}_{IN}(x) = \frac{\underline{U}_{i0}(x)}{\underline{I}_{i0}(x)}. \quad (6.6)$$

Bendruoju atveju ji priklauso nuo koordinatės x . Kai $x = 0$,

$$\underline{Z}_{IN}(0) = \frac{Y_1(\theta)/Y_2(\theta) \sin ka + \sin kbe^{-j\theta}}{jY_1(\theta)(\cos kbe^{-j\theta} - \cos ka)}. \quad (6.7)$$

6.1.2 Meandrinės sistemos modelis

Lovelinės meandrinės sistemos analizei taip pat taikysime daugialaidžių linijų metodą. Sistemos modelis atvaizduotas 6.3 paveiksle. Jį taip pat sudaro vieneilės nevienalytės daugialaidės linijos atkarpos ir ekranai. Kai lėtinimo ir kreipimo sistemos periode yra du daugialaidės linijos laidininkai, joje gali sklisti dvi elektromagnetinės bangos, o laidininkų potencialai ir srovės išreiškiami lygtimis [6]:



6.3 pav. Nevienalytės meandrinės sistemos modelis:

1, 3 – ekranai, 2 – daugialaidės linijos laidininkas, modeliuojantis meandrinį laidininką

$$\underline{U}_{in}(x) = (\underline{A}_{i1} \sin kx + \underline{A}_{i2} \cos kx) e^{-jn\theta} + (\underline{A}_{i3} \sin kx + \underline{A}_{i4} \cos kx) e^{-jn(\theta+\pi)}, \quad (6.8)$$

$$\underline{I}_{in}(x) = jY(\theta)(\underline{A}_{i1} \cos kx - \underline{A}_{i2} \sin kx) e^{-jn\theta} + jY(\theta+\pi)(\underline{A}_{i3} \cos kx - \underline{A}_{i4} \sin kx) e^{-jn(\theta+\pi)}. \quad (6.9)$$

Nevienalytės meandrinės lovelinės sistemos su langu elektronų pluoštui (6.3 paveiksle langą atitinka tamsesnė daugialaidės linijos laidininko dalis) modelis sutampa su žinomu nevienalytės meandrinės sistemos modeliu, todėl analizei pasinaudosime [6] išvesta dispersine lygtimi:

$$\cot^2 \frac{\theta}{2} = \frac{Z_2(\theta)}{Z_2(\theta + \pi)} \frac{Z_1(\theta) \cos kb \cos ka - Z_2(\theta) \sin kb \sin ka}{Z_1(\theta + \pi) \cos kb \sin ka + Z_2(\theta + \pi) \sin kb \cos ka} \times \frac{Z_2(\theta + \pi) \cos kb \cos ka - Z_1(\theta + \pi) \sin kb \sin ka}{Z_2(\theta) \cos kb \sin ka + Z_1(\theta) \sin kb \cos ka}. \quad (6.10)$$

Radę bangos skaičiaus vertę k , atitinkančią pasirinktą fazės kampo θ vertę, bei pasinaudoję (6.4), (6.5) formulėmis, galime rasti lėtinimo koeficiento ir dažnio vertes.

Žinodami koeficientų $\underline{A}_{i1}$, $\underline{A}_{i2}$, $\underline{A}_{i3}$ ir $\underline{A}_{i4}$ sąryšius, galime rasti sistemos įėjimo varžą:

$$\underline{Z}_{IN}(x) = \frac{\underline{U}_{i0}(x)}{\underline{I}_{i0}(x)}. \quad (6.11)$$

Ji priklauso nuo koordinatės x . Kai $x = 0$ [6]:

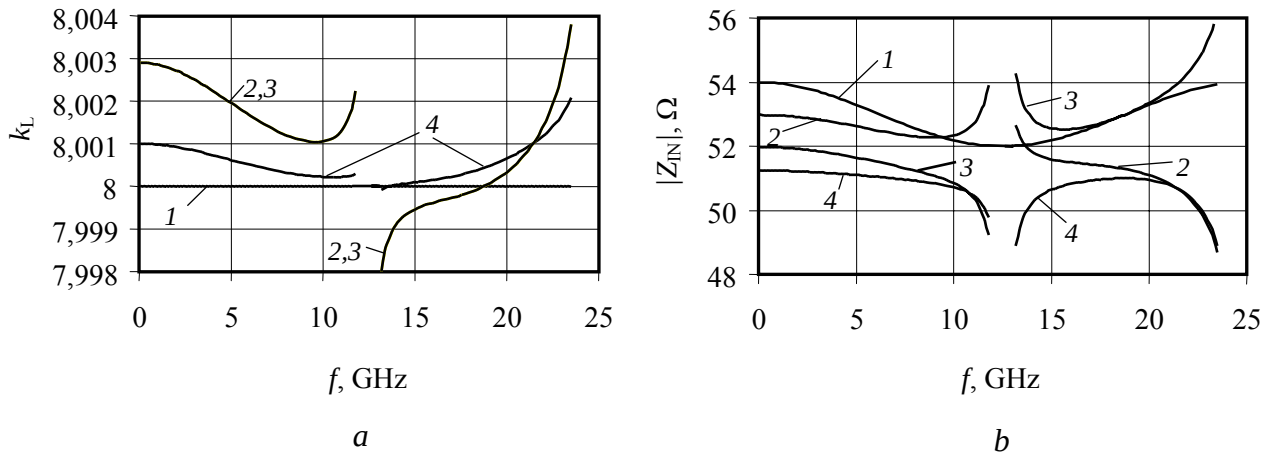
$$\underline{Z}_{IN}(0) = Z_1(\theta) \sqrt{\frac{Z_2(\theta)}{Z_2(\theta + \pi)}} \sqrt{\frac{Z_1(\theta + \pi) \cos kb \sin ka + Z_2(\theta + \pi) \sin kb \cos ka}{Z_1(\theta) \sin kb \cos ka + Z_2(\theta) \cos kb \sin ka}} \times \sqrt{\frac{Z_1(\theta + \pi) \sin kb \sin ka - Z_2(\theta + \pi) \cos kb \cos ka}{Z_2(\theta) \sin kb \sin ka - Z_1(\theta) \cos kb \cos ka}}. \quad (6.12)$$

6.1.3 Lėtinimo koeficiento ir įėjimo varžos skaičiavimo rezultatai ir jų analizė

Daugialaidžių linijų banginiai laidumai, kaip žinoma, priklauso nuo fazės kampo θ ir yra skaičiuojami įvairiais metodais [44]. Šiame skyriuje banginiai laidumai buvo skaičiuojami baigtinių elementų metodu.

Bangos skaičiaus vertės, kurioms esant tenkinamos spiralinės ir meandrinės lėtinimo ir kreipimo sistemų dispersinės lygtys (6.3) ir (6.10), buvo skaičiuojamos priartėjimo būdu, taikant algoritmus, aptartus [4, 6, 44, 142] ir kituose darbuose.

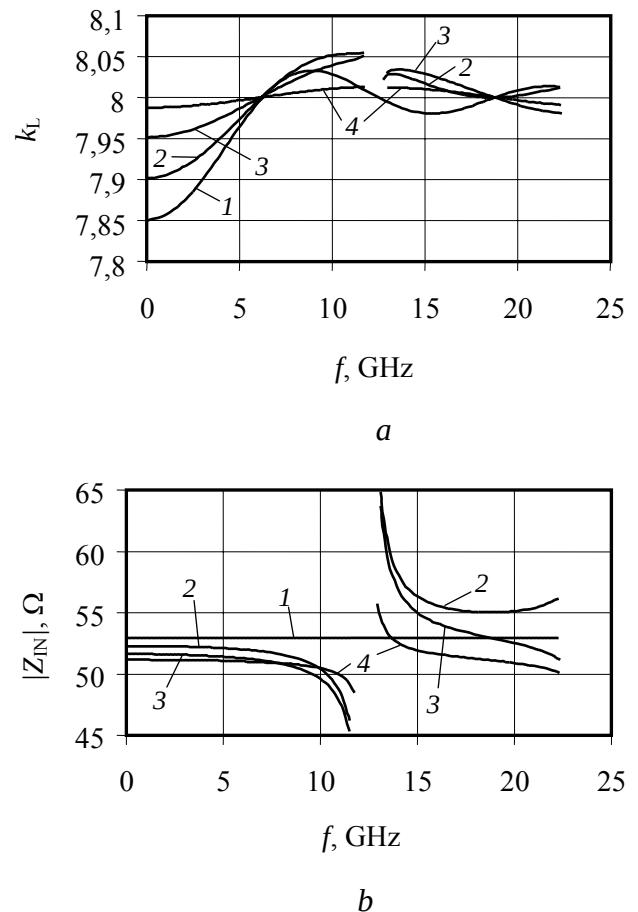
6.4 paveiksle pateiktos vienalytės lovelinės ir nevienalytės lovelinės su langu elektronų pluoštui spiralinių lėtinimo ir kreipimo sistemų lėtinimo koeficiento ir įėjimo varžos priklausomybės nuo dažnio. Grafikuose matyti, kad lovelinės spiralinės sistemos su langu elektronų pluoštui lėtinimo koeficientas ir įėjimo varža priklauso nuo dažnio (6.4 pav., $a, 2, 3, 4$ kreivės). Vienalytės lovelinės spiralinės sistemos lėtinimo koeficientas nepriklauso nuo dažnio (6.4 pav., $a, 1$ kreivė). Žemesniuose dažniuose nevienalytės lovelinės spiralinės sistemos su langu elektronų pluoštui įėjimo varža mažiau priklauso nuo dažnio nei vienalytės lovelinės spiralinės sistemos. Tačiau fazės kampui θ artėjant prie π , atsiranda dažnių ruožas, kuriame nėra dispersinės lygties sprendinių, ir lėtinimo koeficientas bei įėjimo varža ima sparčiai kisti. Dėl šių priežasčių nevienalytė sistema su langu elektronų pluoštui įgyja užtvarinio filtro savybes. Panašios išvados gautos 5 skyriuje analizuojant kitas nevienalytes spiralines ir meandrinės lėtinimo ir kreipimo sistemas.



6.4 pav. Spiralinės lovelinės lėtinimo sistemos lėtinimo koeficiento (a) ir įėjimo varžos (b) priklausomybės nuo dažnio, kai $h = 12$ mm, $L = 1,5$ mm, $l = 0,7$ mm, $p = 0,2$ mm, $t = 0,2$ mm, $r = 0,6$ mm, $w_1 = 0,4$ mm, $w_2 = 0,8$ mm:
1 – $a = 12$ mm; 2 – $a = 8$ mm; 3 – $a = 4$ mm; 4 – $a = 1$ mm

Kuo lango elektronų pluoštui plotis (santykis a/b) yra mažesnis, tuo nevienalytės spiralinės lovelinės sistemos su lango elektronų pluoštui lėtinimo koeficientas ir įėjimo varža mažiau priklauso nuo dažnio ir gaunama siauresnė užtvarinė juosta. Dydis $\Delta t_v = \Delta k_L l_S / c_0$, turintis įtakos dažniniams išskrypimams elektroniniame vamzdyje ir pereinamosios charakteristikos kilimo trukmei, yra mažas (kai lėtinimo ir kreipimo sistemos ilgis $l_S = 60$ mm, pagal 6.4 paveikslo, a, 2, 3 kreives $\Delta t_v = 6 \cdot 10^{-13}$ s, čia Δt_v – vėlinimo trukmės pokytis, Δk_L – lėtinimo koeficiento pokytis), todėl lango elektronų pluoštui įtaka lėtinimo koeficientui yra labai nedidelė. Dar svarbu, kad užtvarinė juosta yra už elektroninio vamzdžio pralaidumo juostos ribų.

6.5 paveiksle, a, b, pavaizduotos vienalytės lovelinės (1 kreivė) ir nevienalytės lovelinės (2, 3, 4 kreivės) meandrinių lėtinimo ir kreipimo sistemų lėtinimo koeficiento ir įėjimo



6.5 pav. Meandrinės lovelinės lėtinimo sistemos lėtinimo koeficiento (a) ir įėjimo varžos (b) priklausomybės nuo dažnio, kai $2h = 12$ mm; $L = 1,5$ mm, $l = 0,7$ mm, $p = 0,2$ mm, $t = 0,2$ mm, $r = 0,6$ mm, $w_1 = 0,4$ mm, $w_2 = 0,8$ mm:
1 – $2a = 12$ mm; 2 – $2a = 8$ mm; 3 – $2a = 4$ mm; 4 – $2a = 1$ mm

varžos priklausomybės nuo dažnio. Matome, kad abiejų tipų lovelinių meandrinė sistemų lėtinimo koeficientas priklauso nuo dažnio (6.5 pav., *a*). Vienalytės lovelinės meandrinės sistemos įėjimo varža mažai priklauso nuo dažnio (6.5 pav., *b*, 1 kreivė). Tuo tarpu esant nevienalytei lovelinei sistemai ši priklausomybė ryškesnė (6.5 pav., *b*, 2, 3, 4 kreivė). Kaip ir spiralinės sistemos atveju, fazės kampui θ artėjant prie π , nevienalytės meandrinės lovelinės sistemos su langu elektronų pluoštui lėtinimo koeficiento ir įėjimo varžos priklausomybėse nuo dažnio atsiranda užtvarinė juosta. Tačiau nevienalytės meandrinės lovelinės sistemos su langu elektronų pluoštui lėtinimo koeficientas kinta mažiau nei vienalytės lovelinės meandrinės sistemos atveju.

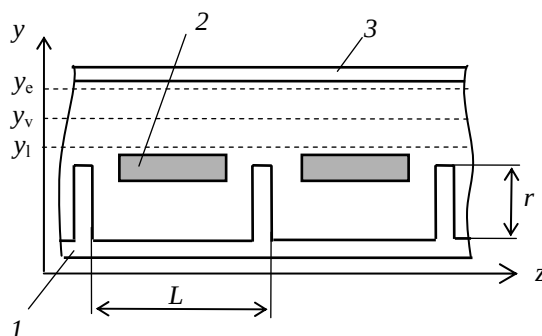
Iš 6.5 paveikslo, *a*, *b*, grafikų matyti, kad kuo lango elektronų pluoštui plotis (santykis a/b) mažesnis, tuo nevienalytės meandrinės lovelinės sistemos lėtinimo koeficientas ir įėjimo varža mažiau priklauso nuo dažnio ir gaunama siauresnė užtvarinė juosta.

6.1.4 Skersinio elektrinio lauko skaičiavimo rezultatai ir analizė

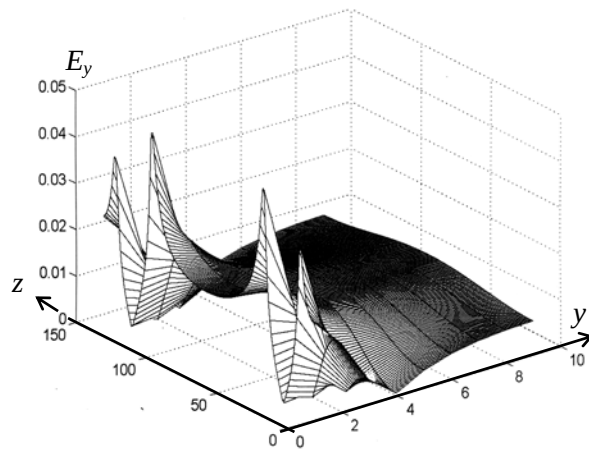
Plačiajuostėse meandrinėse linijose sužadinama elektromagnetinė banga, kurios sinfazinės dedamosios įtampa ties meandro viduriu (6.3 pav., $x=0$) maksimali ir tolstant link jo kraštų simetriškai mažėja pagal kosinuso dėsnį, o priešfazinės dedamosios įtampa ties meandro viduriu visuomet lygi nuliui ir tolstant nuo jo antisimetriškai didėja pagal sinuso dėsnį [26]. Todėl ties meandro viduriu (6.3 pav., $x=0$) elektrinio lauko pasiskirstymas sutampa su spiralinės sistemos elektrinio lauko pasiskirstymu (6.2 pav., $x<0$). Be to, kai $x=0$ (6.3 pav.), meandrinėse sistemose, o kai $x<0$ (6.2 pav.), – spiralinėse sistemose elektrinio lauko pasiskirstymas nevienalytėse lovelinėse spiralinėse ir meandrinėse sistemose sutampa su vienalyčių lovelinių spiralinių ir meandrinė sistemų elektrinio lauko pasiskirstymu. Todėl vienalyčių ir nevienalyčių lovelinių spiralinių ir meandrinė sistemų elektrinio lauko analizės rezultatai, kai $x=0$, meandrinėse sistemose (6.2 pav.), o kai $x<0$, – spiralinėse sistemose (6.3 pav.), sutampa. Kadangi pagal 6.3 ir 6.4 paveikslus

dispersija lovelinėse sistemose labai nedidelė, nagrinėdami elektrinio lauko pasiskirstymą, į ją neatsižvelgsime.

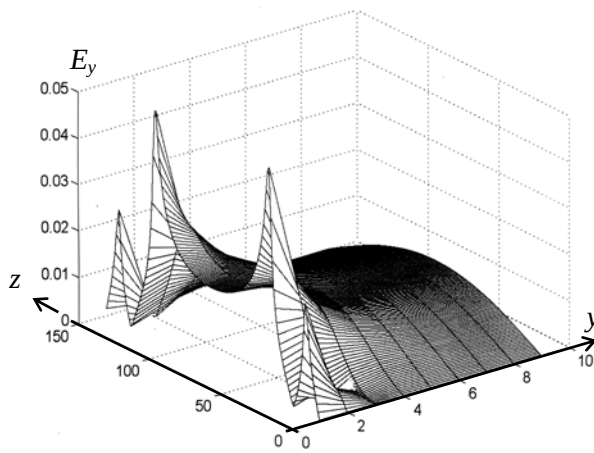
Elektrinio lauko stiprumo pasiskirstymą lėtinimo ir kreipimo sistemoje galime rasti žinodami potencialų pasiskirstymą daugialaidės linijos skerspjūvyje, kurį atitinka lovelinės sistemos išilginis pjūvis, parodytas 6.6 paveiksle.



6.6 pav. Lovelinės lėtinimo sistemos pjūvio fragmentas:
1 – ekranas; 2 – laidininkas; 3 – viršutinis ekranas



a



b

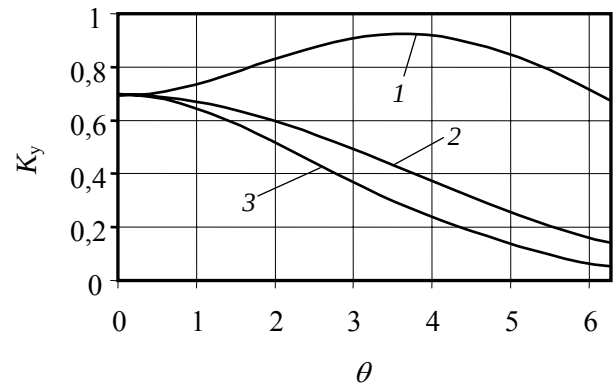
6.7 pav. Skersinės elektrinio lauko dedamosios pasiskirstymas spiralinės lovelinės sistemos periodu (6.6 paveikslas daugialaidės linijos dalyje nuo y_1 iki y_e), kai $\theta = 0$ (a) ir kai $\theta = \pi$ (b) (ašyse – santykiniai vienetai)

modeliuose, kai $L = 1,5$ mm, $l = 0,7$ mm, $p = 0,2$ mm, $t = 0,2$ mm, $r = 0,6$ mm, $w_1 = 0,4$ mm, $w_2 = 0,8$ mm, $\theta = 0$ (6.7 pav., a) ir $\theta = \pi$ (6.7 pav., b). Iš 6.7 paveikslas matome, kad lovelinėse lėtinimo ir kreipimo sistemose jau žemųjų dažnių srityje susidaro elektrinis laukas tarpuose tarp laidininkų (tarp laidininkų ir ekranuojančių sienelių), todėl elektrinio lauko skersinės dedamosios priklausomybė nuo dažnio yra mažesnė nei lėtinimo ir kreipimo sistemose be ekranuojančių sienelių.

Skersinio elektrinio lauko stiprumo priklausomybę nuo θ ir dažnio galime apibūdinti koeficientu [142]

$$K_y = E_{y0m}/E; \quad (6.13)$$

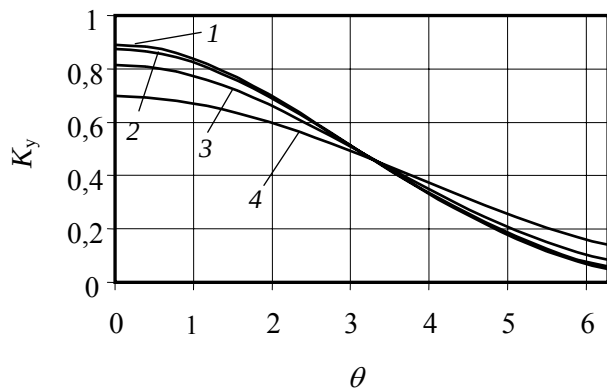
čia $E = U_m/w_2 = 1/w_2$ – elektrinio lauko stiprumas elektrostatinėje lėtinimo ir kreipimo sistemoje, kai $U_m = 1$ V.



6.8 pav. Lovelinės sistemos koeficiento K_y priklausomybės nuo fazės kampo θ , kai $L = 1,5$ mm, $l = 0,7$ mm, $p = 0,2$ mm, $t = 0,2$ mm, $r = 0,6$ mm, $w_1 = 0,4$ mm, $w_2 = 0,8$ mm:
1 – $y = y_1$; 2 – $y = y_v$; 3 – $y = y_e$

Daugialaidės linijos skerspjūvio taškų potencialus, esant bet kokiam fazės kampui θ , galime rasti žinodami taškų potencialus, apskaičiuotus, kai $\theta = 0$ ir $\theta = \pi$ [142]. Daugialaidės linijos skerspjūvio taškų potencialų vertės, kai $\theta = 0$ ir $\theta = \pi$, buvo skaičiuojamos baigtinių elementų metodu [71].

6.7 paveiksle atvaizduotas skersinės elektrinio lauko dedamosios pasiskirstymas erdvėje tarp spiralės ir viršutinio ekrano lovelinės spiralinės arba tarp meandro ir viršutinio ekrano lovelinės meandrinės sistemos



6.9 pav. Lovelinės sistemos koeficiento K_y priklausomybės nuo fazės kampo θ , kai $y=y_v$, $L = 1,5$ mm, atstumas tarp laidininkų $l = 0,7$ mm, laidininko storis $p = 0,2$ mm, ekranuojančiosios sienelės plotis $t = 0,2$ mm, tarpai tarp spiralės ir ekranų $w_1 = 0,4$ mm, $w_2 = 0,8$ mm:
 1 – $r = 0$; 2 – $r = 0,2$ mm; 3 – $r = 0,4$ mm;
 4 – $r = 0,6$ mm

6.8 paveikslo matome, kad koeficientas K_y priklauso nuo dažnio (fazės kampo θ). Dėl elektrodo diskretiškumo elektrinio lauko skersinės dedamosios nulinės erdvinės harmonikos amplitudė E_{y0} žemųjų dažnių srityje yra apie 30 % silpnesnė nei elektrinio lauko stiprumas E elektrostatinėje lėtinimo ir kreipimo sistemoje. Todėl lovelinė lėtinimo ir kreipimo sistema pasižymėtų mažesniu jautriu, kuris tiesiogiai proporcingas $K_y(\theta, y)$. Pjūvyje $y = y_1$ koeficientas K_y didėja ir, kai $\theta = \pi$, pradeda mažėti. Viduryje tarp laidininko ir viršutinio ekrano ($y = y_v$) bei pjūvyje $y = y_e$ koeficientas K_y pradeda mažėti, kai $\theta > 0$. Iš 6.8 paveikslo taip pat matyti, kad koeficientas K_y priklauso nuo skersinės koordinatės y . Tai lemia paviršinis elektrinio lauko pobūdis periodinėje lėtinimo ir kreipimo sistemoje.

6.9 paveikslas parodo, kad kuo ekranuojančioji sienelė aukštesnė, tuo koeficientas K_y (o kartu ir elektrinio lauko skersinė dedamoji) nuo dažnio priklauso mažiau. Deja, didėjant ekranuojančiosios sienelės aukščiui, mažėtų bėgančiosios bangos elektroninio vamzdžio jautris.

6.2 Nevienalytės lovelinės spiralinės lėtinimo ir kreipimo sistemos analizė automatizuoto projektavimo programa

6.2.1 Vienalytės ir nevienalytės lovelinių spiralinių lėtinimo ir kreipimo sistemų modeliai

Baigtinių elementų, baigtinių skirtumų, momentų (integralinių lygčių) ir kiti skaitiniai metodai, kurių principais remiasi daugelis programinės įrangos paketų, skirtų elektromagnetinių laukų ir superplaciajuosčių mikrobangų įtaisų projektavimui ir tyrimui, gali būti naudojami lėtinimo

ir kreipimo sistemų analizei. Tam gerai tinka automatizuoto projektavimo programinis paketas *CST Microwave Studio* sukurtas kompanijos *Computer Simulation Technology (CST)* [128].

CST Microwave Studio programa taiko integralinių lygčių metodą (*FIT*), kuris, įvertindamas energijos tvermės dėsnį, iš pradžių aprašo Maksvelo erdvinio tinklėlio lygtis, o po to formuoja specifines diferencialines lygtis (banginę arba Puasono). Metodas gali būti įgyvendintas dažnių arba laiko srityse. Įtaiso skaidymo tinklėliui apribojimų nėra: greta įprasto stačiakampio tinklėlio Dekarto koordinatų sistemoje palaikomi ir nestabiakampiai tinklėliai, pavyzdžiui, tetraedrinis [99].

Baigtinių integralų metodas laiko srityje efektyviausias tada, kai naudojamas stačiakampis skaidymo tinklėlis. Bet kokios formos tūrinių struktūrų modeliavimui pagerinti yra sukurtas originalus aproksimacijos būdas idealioms ribinėms sąlygoms (*Perfect Boundary Approximation, PBA*). Šis būdas leidžia kubinę tinklėlio ląstelę suskaidyti į dvi dalis taip, kad skaidymo riba sutaptų su dviejų skirtingų aplinkų skiriamąja riba ir atspindėtų realią modeliuojamos struktūros geometriją [99].

Šio būdo galimybes išplėtė plonų sienelių metodas (*Thin Sheet Technique, TST*), leidžiantis optimaliai pateikti dvi kubinės tinklėlio ląstelės dalis, atskirtas plona metaline sienele. Paskutinėje, 5-oje programų paketo versijoje panaudota dar viena skaidymo technologija – potinklių metodas (*Multilevel Subgridding Scheme, MSS*). Jis leidžia skaidymo linijoms prasidėti ir baigtis bet kuriame analizuojamo tūrio taške. Taigi esant bet kokios formos elementams galima gauti ypatingus sluoksnius su susmulkintu skaidymo tinklėliu. PBA ir TST metodai galioja ir susmulkintiems tinklėlio elementams. Tai dar padidina analizės tikslumą. Nors vartotojas gali lengvai pakeisti tinklėlį, norėdamas tiksliau aprašyti objektą kritinėse modeliuojamos struktūros srityse, sistema, padedama specialios ekspertinės sistemos, automatiškai parenka optimalų tinklėlį [99].

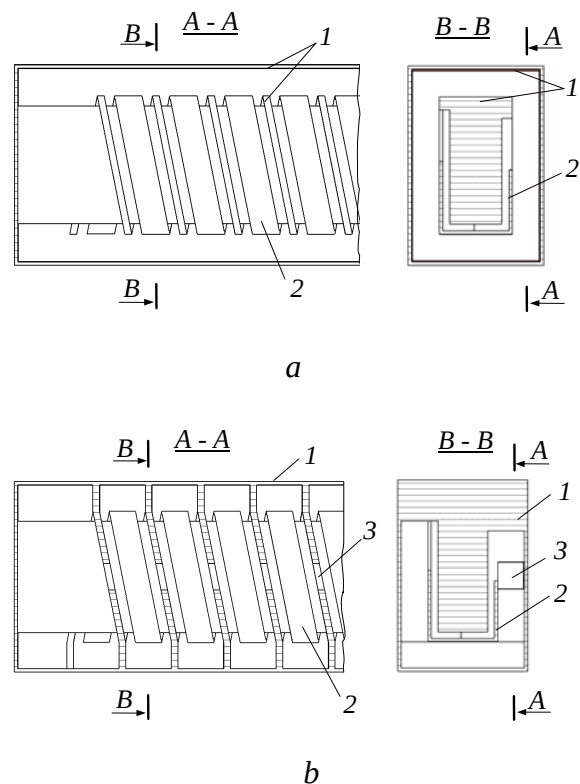
Akivaizdu, kad didžiausias baigtinių skirtumų ir į jį panašių metodų trūkumas yra nepakankamai tikslus tūrinių paviršių pateikimas. Sukurtas unikalus *PBA* metodas leidžia modeliuoti bet kokios formos kreivinius paviršius, išvengti laiptuoto priartėjimo paklaidos, nereikalaudamas smulkiausio skaidymo tinklėlio. Metodas taip pat leidžia įvertinti metalinių sluoksnių arba mikrojuostelinių linijų storį papildomai nesuskaidytoje tinklėlio skiltyje [99].

Pagrindinis baigtinių integralų metodo pranašumas yra elektromagnetinio lauko charakteristikų laiko srityje skaičiavimo tikslumas. Vieną kartą paleista skaičiavimo programa gali modeliuoti sistemą plačiame dažnių ruože. Sistemos charakteristikos apskaičiuojamos gana greitai, įskaitant ir aštrius rezonansų pikus. Nuostoliai dielektrinėse medžiagose įvertinami dielektrinių nuostolių kampo tangentu arba laidumu, o laidininkuose – paviršinės varžos modeliu. Skaičiavimo branduolys dažnių ašyje (*Frequency Domain Solver*) turi adaptyvųjį dažnių svyravimo algoritmą, leidžiantį gauti tikslias charakteristikas esant minimaliam, automatiškai pasirinktam dažnių taškų skaičiui. Ypač daug dėmesio skiriama modų skaičiavimui sistemos prievaduose, įvertinant

nuostolius medžiagose. Skaičiavimo branduolys yra pritaikytas lėtinimo sistemoms tirti, kadangi palaiko periodines ribines sąlygas [99].

6.10 paveiksle, *a*, pateiktas tirtos vienalytės lovelinės spiralinės sistemos modelis, sukurtas naudojant *CST Microwave Studio* grafinį redaktorių. Sistemą sudaro spiralė 1, vidinis 2 ir išorinis 3 ekranai bei ekranuojančiosios sienelės 4 vienalyčiai sujungtos su vidiniu ekranu. Sistemos konstrukciniai parametrai – spiralės plotis, aukštis ir vijos žingsnis, lemiantys konstrukcinio lėtinimo koeficiento vertę, ir sistemos banginė varža žemutinių dažnių srityje, užtikrinta parenkant spiralės ir vidinio ekrano matmenis bei atstumą nuo spiralės iki išorinio ekrano, – kaip ir 6.1 skyriuje.

6.10 paveiksle, *b*, pateiktas tirtos nevienalytės lovelinės spiralinės sistemos modelis. Sistemą sudaro spiralė 1, vidinis 2 ir išorinis 3 ekranai bei ekranuojančiosios sienelės 4 vienalyčiai sujungtos su vidiniu ekranu bei ekranuojančiųjų sienelių aukštis padidintas tiek, kad šios sienelės jungtų apatinį ir viršutinį ekranus paliekant langą elektronų pluoštui. Sistemos banginė varža, konstrukciniai matmenys – spiralės plotis, aukštis ir vijos žingsnis parinkti tokie kaip ir vienalytės sistemos atveju.



6.10 pav. Vienalytės (*a*) ir nevienalytės (*b*) lovelinių spiralinių sistemų modeliai analizei automatizuoto projektavimo paketu: 1 – ekranai; 2 – spiralinis elektrodas; 3 – langas elektronų pluoštui

6.2.2 Lovelinių spiralinių lėtinimo ir kreipimo sistemų tyrimas

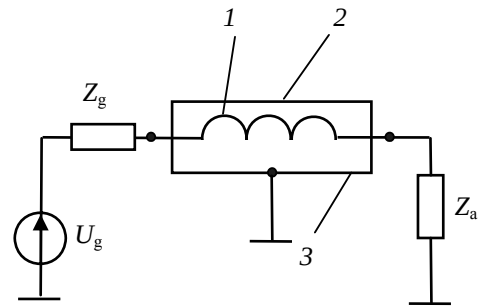
6.11 paveiksle pateikta spiralinės sistemos tyrimo schema. Spiralės įėjime prijungtas signalo šaltinis U_g su vidine varža Z_g , o išėjimas apkrautas varža Z_a . Šios varžos yra parinktos lygios sistemos banginei varžai 50Ω žemųjų dažnių srityje. Ši banginės varžos reikšmė gauta prie tokių sistemos (6.1 pav.) matmenų: spiralės žingsnis $L = 1,6$ mm, vijos plotis $d = 0,8$ mm, spiralės plotis $h = 4$ mm, spiralės aukštis $b = 2$ mm, atstumai nuo vidinio ekrano iki spiralės $w_{11} = w_{12} = 0,4$ mm, atstumai nuo spiralės iki išorinio ekrano $w_{21} = w_{22} = 0,8$ mm, vidinio ekrano plotis $d_3 = 3,6$ mm, laidininko storis $p = 0,2$ mm, ekranuojančiosios sienelės storis $t = 0,2$ mm, ekranuojančiosios

sienelės aukštis vienalytės lovelinės sistemos atveju ir ekranuojančiosios sienelės aukštis ties langu elektronų pluoštui nevienalytės lovelinės spiralinės sistemos atveju $r = 0,6$ mm.

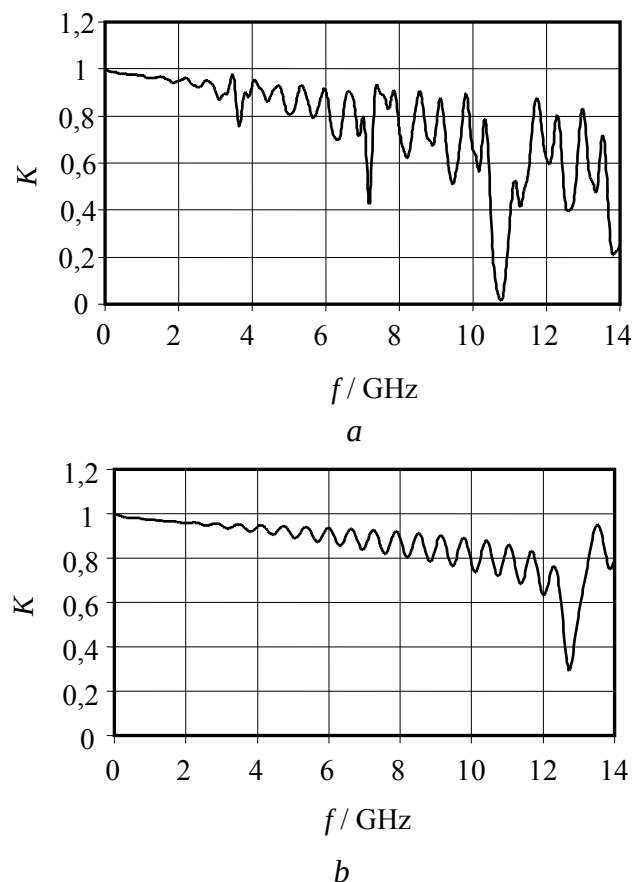
Tirtų sistemų vidinio ir išorinio ekranų galai yra trumpai sujungti tarpusavyje ir sudaro abiejuose galuose užtrumpintą koaksinės linijos atkarpą (ilgosios linijos rezonansinę atkarpą), kuri gali turėti įtakos bėgančiosios bangos elektroninių vamzdžių charakteristikoms.

Koaksinė linija, kurią sudaro spiralinės sistemos vidinis ir išorinis ekranai, turi savybę susižadinti [101]. Susižadinimo metu gaunamų rezonansų priežastys išsamiai išnagrinėtos [182]. Rezonansai priklauso nuo ekranų ilgio bei jų tarpusavio sujungimo būdo [101]. Parazitinis rezonansas sistemoje susižadina, kai išilgai abiejuose galuose užtrumpintos koaksinės linijos telpa sveikas nesulėtintos bangos ilgio pusių skaičius [101].

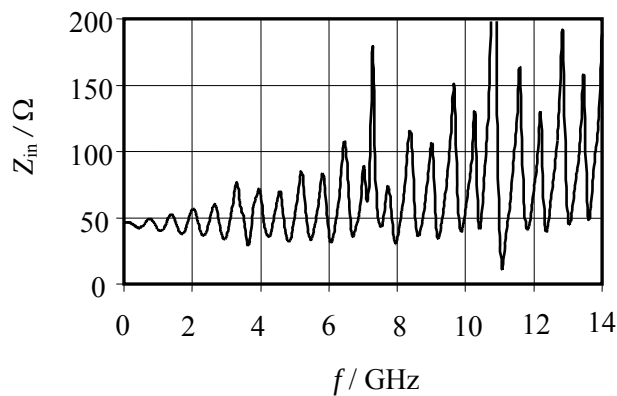
6.12 paveiksle pavaizduotos vienalytės (a) ir nevienalytės (b) lovelinių sistemų dažninės amplitudės charakteristikos, gautos skaičiuojant su *CST Microwave Studio* programiniu paketu. Kaip matome iš 6.12 paveikslo, a, vienalytė lovelinė sistema susižadina (ties dažniais $\sim n \cdot \text{GHz}$, čia $n=1, 2, 3, \dots$), kai išilgai koaksinės linijos telpa sveikas nesulėtintos bangos ilgio pusių skaičius. Iš 6.12 paveikslo, b, matome, kad kai sistema yra nevienalytė, parazitinių rezonansinių reiškinių, atsirandančių dėl užtrumpintos koaksinės linijos atkarpos susižadinimo, nėra, kas patvirtina [132, 135] suformuluotas mintis. Taip yra todėl, kad ekranuojančiosios sienelės užtrumpina vidinį ir išorinį ekranus. Tačiau dėl lėtinimo ir kreipimo sistemos nevienalytiškumo, atsirandančio dėl lango elektronų pluoštui ekranuojančiose sienelėse, atsiranda rezonansas (6.12, pav., b). Tai patvirtina 6.1 skyriuje daugialaidžių linijų



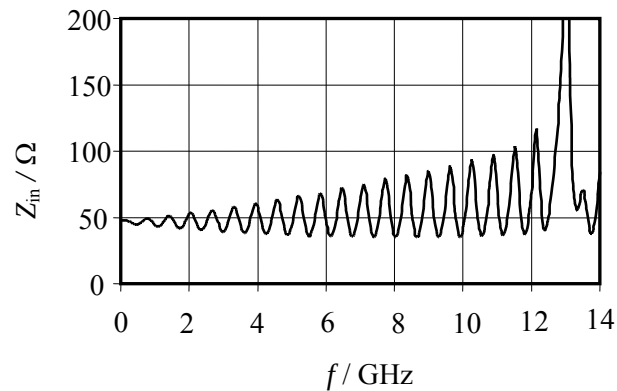
6.11 pav. Spiralinių lovelinių lėtinimo sistemų tyrimo schema: 1 – spiralė; 2, 3 – ekranai



6.12 pav. Vienalytės (a) ir nevienalytės (b) lovelinių spiralinių lėtinimo ir kreipimo sistemų dažninės amplitudės charakteristikos

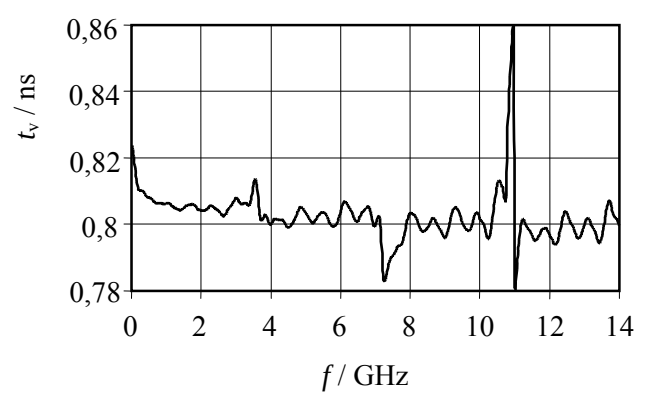


a

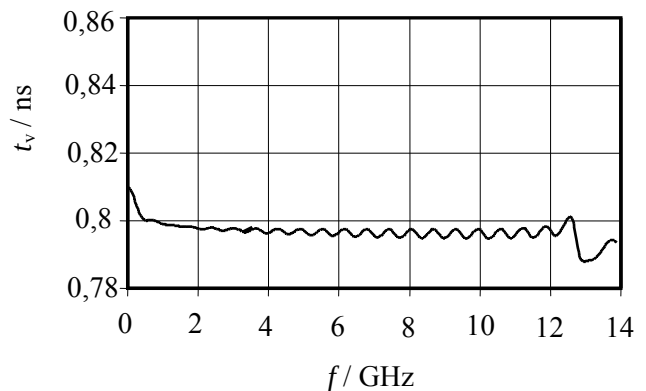


b

6.13 pav. Vienalytės (a) ir nevienalytės (b) lovelinių spiralinių lėtinimo ir kreipimo sistemų įėjimo varžos priklausomybės nuo dažnio



a



b

6.14 pav. Vienalytės (a) ir nevienalytės (b) lovelinių spiralinių lėtinimo ir kreipimo sistemų fazės vėlinimo laiko priklausomybės nuo dažnio

metodu gautus rezultatus, kad nevienalytės spiralinės lovelinės lėtinimo ir kreipimo sistemos įgyja užtvarinio filtro savybes, kai, didėjant dažniui, fazės kampas θ tarp gretimų spiralės laidininkų įtampų ar srovių artėja prie π .

6.13 paveiksle pateiktos įėjimo varžos priklausomybės nuo dažnio. Šiose priklausomybės taip pat galime pamatyti rezonansinius reiškinius aptartus prieš tai. 6.13 paveiksle, a, b, įėjimo varžos priklausomybėse nuo dažnio svyravimai atsiranda dėl banginės varžos kitimo, reaktyvumų sistemos galuose ir rezonansinių reiškinių. Kaip matome svyravimai nevienalytės lovelinės sistemos atveju (6.13 pav., b) yra mažesni nei vienalytės sistemos atveju (6.13 pav., a). Taip yra todėl, kad nevienalytės sistemos atveju išvengiame rezonansinių reiškinių, kurie atsiranda, kai išilgai koaksinės linijos telpa sveikas nesulėtintos bangos ilgio pusių skaičius.

Norint suderinti elektronų pluošto ir elektromagnetinės bangos, sklindančios sistemoje, greičius lėtinimo koeficientas ir fazės vėlinimo laikas turi būti pastovūs. Fazės vėlinimo laiką galime apskaičiuoti trumpai sujungę sistemos galus. Apskaičiuotos fazės vėlinimo laiko priklausomybės nuo dažnio pateiktos 6.14 paveiksle. Žinodami fazės vėlinimo laiką galime apskaičiuoti lėtinimo koeficientą:

$$k_L = \frac{t_v \cdot c_0}{L_s}, \quad (6.14)$$

čia L_s – spiralinės sistemos ilgis.

6.3 Išvados

1. Nevienalytės spiralinės lovelinės lėtinimo ir kreipimo sistemos su langu elektronų pluoštui įėjimo varža mažiau priklauso nuo dažnio nei vienalytės spiralinės lovelinės sistemos įėjimo varža.
2. Nevienalytės meandrinės lovelinės lėtinimo ir kreipimo sistemos lėtinimo koeficientas mažiau priklauso nuo dažnio nei vienalytės meandrinės lovelinės sistemos.
3. Nevienalytės spiralinės lovelinės ir meandrinės lovelinės lėtinimo ir kreipimo sistemos įgyja užtvarinių filtrų savybes, kai, didėjant dažniui, fazės kampas θ tarp gretimų spiralės ar meandro laidininkų įtampų ar srovių artėja prie π . Lėtinimo koeficientas ir įėjimo varža kinta tuo mažiau ir užtvarinės juostos plotis tuo mažesnis, kuo mažesnis lango elektronų pluoštui plotis (santykis a/b).
4. Lovelinių spiralinių ir meandrinių lėtinimo ir kreipimo sistemų koeficientas K_y , apibūdinantis skersinio elektrinio lauko nulinės erdvinės harmonikos stiprumą, priklauso nuo dažnio mažiau nei paprastose (be ekranuojančių sienelių) spiralinėse ir meandrinėse lėtinimo ir kreipimo sistemose.
5. Taikant nevienalytes lovelines lėtinimo ir kreipimo sistemas su langu elektronų pluoštui, šio lango plotį (santykį a/b) dera parinkti kiek įmanoma mažesnį.
6. Naudojant elektroninius bėgančiosios bangos vamzdžius su vienalytėmis lovelinėmis spiralinėmis sistemomis, jų dažninėse charakteristikose atsiranda parazitiniai rezonansai, kai išilgai koaksinės linijos, kurią sudaro vidinis ir išorinis sistemos ekranai, telpa sveikas nesulėtintos bangos ilgio pusių skaičius. Šie rezonansai blogina dažnines sistemos charakteristikas. Kai naudojamos nevienalytės lovelinės lėtinimo ir kreipimo sistemos, dėl vidinio ir išorinio ekranų užtrumpinimo nepageidaujamų rezonansinių reiškinių neatsiranda, kol fazės skirtumo θ tarp gretimų spiralės laidininkų įtampų ar srovių reikšmė yra mažesnė už π .
7. Lovelinių spiralinių lėtinimo ir kreipimo sistemų analizei gerai tinka daugialaidžių linijų ir programinio paketo *CST Microwave Studio* sinergija.

Darbo rezultatų apibendrinimas

Šio darbo tikslas buvo tirti nepakankamai nagrinėtų elektrodinaminių superplaciajuosčių lėtinimo ir kreipimo sistemų variantus, sudaryti jų modelius, tobulinti analizės metodus, analizuoti savybes, atskleisti bėgančiosios bangos elektroninių vamzdžių bei lėtinimo ir kreipimo sistemų potencines galimybes.

Pagrindiniai vykdyti darbai ir gauti rezultatai yra šie:

1. Tobulinta netiesinių iškraipymų įvertinimo bėgančiosios bangos elektroniniuose vamzdžiuose metodika ir atskleistos netiesinių iškraipymų mažinimo galimybės. Netiesinius virpesių vaizdų formos iškraipymus ir elektronų pluošto išsifokusavimą galima sumažinti taikant lovelines arba simetrines bėgančiosios bangos lėtinimo ir kreipimo sistemas.
2. Sudaryti mažai nagrinėtų lėtinimo ir kreipimo sistemų variantų modeliai ir ištirtos lėtinimo ir kreipimo sistemų savybės.
 - 2.1. Dėl nuostolių trumpai sujungtose vijose kinta kvazisimetrinės spiralinės lėtinimo ir kreipimo sistemos lėtinimo koeficientas ir sistemos įėjimo varža žemųjų dažnių srityje ir padidėja signalo slopinimas kvazisimetrinėje sistemoje. Trumpai sujungtų vijų įtaka slopinimui tuo didesnė, kuo didesnės vijų varžos ir kuo stipresnis elektromagnetinis ryšys tarp spiralės ir trumpai sujungtų vijų.
 - 2.2. Spiralės su trumpai sujungtomis vijomis įtaka kvazisimetrinės sistemos savybėms nėra didelė, tačiau gali atsiliepti bėgančiosios bangos elektroninio vamzdžio atestavimo rezultatams.
 - 2.3. Dvипradės lėtinimo ir kreipimo sistemos su skirtingo pločio laidininkais praleidžiamų dažnių juosta yra siauresnė nei $1/4t_v$, čia t_v yra vėlinimo laikas vijoje. Mažinant gretimų laidininkų pločių santykį, lėtinimo koeficientas mažėja ir įėjimo varža nuo dažnio priklauso mažiau.
 - 2.4. Kreipiančiojo elektrinio lauko stipris dvipradėje kreipimo sistemoje labai priklauso nuo gretimų vijų laidininkų pločių santykio.
 - 2.5. Dvипradės spiralinės sistemos, sudarytos iš dviejų viena į kitą įsuktų bendraašių spiralių, savybes galima pagerinti taikant vidinį ekraną.

2.6. Nevienalytės spiralinės lovelinės lėtinimo ir kreipimo sistemos su langu elektronų pluoštui įėjimo varža mažiau priklauso nuo dažnio nei vienalytės spiralinės lovelinės sistemos įėjimo varža. Nevienalytės meandrinės lovelinės lėtinimo ir kreipimo sistemos lėtinimo koeficientas mažiau priklauso nuo dažnio nei vienalytės meandrinės lovelinės sistemos.

2.7. Lovelinių spiralinių ir meandrinų lėtinimo ir kreipimo sistemų koeficientas K_y , apibūdinantis skersinio elektrinio lauko nulinės erdvinės harmonikos stiprį, priklauso nuo dažnio mažiau nei paprastose (be ekranuojančių sienelių) spiralinėse ir meandrinėse lėtinimo ir kreipimo sistemose.

2.8. Naudojant elektroninius bėgančiosios bangos vamzdžius su vienalytėmis lovelinėmis spiralinėmis sistemomis dažninėse charakteristikose atsiranda parazitiniai rezonansai, kai išilgai koaksinės linijos, kurią sudaro vidinis ir išorinis sistemos ekranai, telpa sveikas nesulėtintos bangos ilgio pusių skaičius. Naudojant nevienalytes lovelines lėtinimo ir kreipimo sistemas nepageidaujamų rezonansinių reiškinių galima išvengti.

3. Atskleista periodinių netolygumų įtaka lėtinimo ir kreipimo sistemų savybėms, modeliuota ir analizuota jungių įtaka lėtinimo ir kreipimo sistemų ir bėgančiosios bangos elektroninių vamzdžių savybėms.

3.1. Spiralinės, meandrinės ir lovelinės lėtinimo ir kreipimo sistemos dėl periodinio elektrinio netolygumo įgyja juostinių užtvarinių filtrų savybes, kai, didėjant dažniui, fazės kampas θ tarp gretimų spiralės ar meandro vijų įtampų ar srovių artėja prie π .

3.2. Spiralinės lėtinimo ir kreipimo sistemos užtvarinė juosta tuo platesnė, kuo didesnis sistemos nevienalyčių dalių banginių laidumų santykis.

3.3. Kai yra periodinių talpinio pobūdžio netolygumų, užtvarinės juostos plotis priklauso nuo talpų santykio ir nuotolių tarp talpų santykio. Kai šie santykiai artėja prie 1, užtvarinė juosta siaurėja. Kai paminėti santykiai tampa lygūs 1, užtvarinė juosta pasislenka į beveik dvigubai aukštesnių dažnių sritį. Užtvarinės juostos vietą dažnių ašyje lemia ne spiralės vijos ilgis, o vienodų vijos dalių ilgis (netolygumų periodas). Vietoje vieno spiralinio elektrodo dielektrinio laikiklio verta numatyti bent du vienodus laikiklius, tarp kurių vijos atkarpos vienodos.

3.4. Taikant nevienalytes lovelines lėtinimo ir kreipimo sistemas su langu elektronų pluoštui, šio lango plotį dera parinkti kiek įmanoma mažesnį.

3.5. Lėtinimo ir kreipimo sistemos ir signalinio trakto jungės (susiaurintos sistemos galinės vijos) aukštųjų dažnių srityje gali veikti kaip ketvirčio bangos ilgio suderinimo transformatoriai. Kai jų banginė varža žemųjų dažnių srityje lygi signalinio trakto banginei varžai, tinkamai parinkus jungių ilgį, galima sumažinti atspindžius nuo lėtinimo ir kreipimo sistemos galų ir gauti tolygią trakto amplitudės dažninę charakteristiką.

4. Atlikta bėgančiosios bangos elektroninių vamzdžių bei lėtinimo ir kreipimo sistemų potencinių galimybių analizė, parenkant lėtinimo ir kreipimo sistemų variantus, leidžiančius užtikrinti

bėgančiosios bangos elektroninių vamzdžių plačią praleidžiamų dažnių juosta ir aukštą veikimo spartą.

4.1. Siekiant, kad, didėjant dažniui, mažai kistų elektromagnetinės bangos greitis, lėtinimo ir kreipimo sistemos banginė varža ir lengviau būtų sprendžiami sistemos sąsajos su signaliniu traktu klausimai, būtų gaunami mažesni netiesiniai virpesių vaizdų formos iškraipymai tarp lėtinimo ir kreipimo sistemos spiralės ar meandro vijų reikia sudaryti ekranuojančiąsias sieneles.

4.2. Norint dar labiau pagerinti sistemos dispersines charakteristikas naudotinos spiralinių ir meandrinių bėgančiosios bangos lėtinimo ir kreipimo sistemos, kuriose ekranuojančiųjų sienelių aukštis padidintas tiek, kad šios sienelės jungtų apatinį ir viršutinį ekranus, bei turėtų angas elektronų pluoštui.

4.3. Pagal modeliavimo rezultatus bėgančiosios bangos elektroninio vamzdžio praleidžiamų dažnių juostos plotį galima praplėsti iki 12 GHz.

Kitų autorių literatūros sąrašas

1. **Sroka, J.** Oscilloscope Influence on the Calibration Uncertainty of the Pulse Rise Time of ESD Simulator. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 2003, vol. 1, p. 378–381.
2. **Fiorentin P.** Flatness Analysis of the Oscilloscope Frequency Response by Accurate Step Generator. *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 2001, vol. 3, p. 2066–2069.
3. **Mittermayer, Ch.; Steininger, A.** On the Determination of Dynamic Errors for Rise Time Measurement with Oscilloscope. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1999, vol. 48, no. 6, p. 1103–1107.
4. **Štaras, S.; Skudutis, J.** Travelling-wave deflecting systems. *Software for Electrical Engineering Analysis and Design*, Boston, Southampton, 1999, p. 23–32.
5. **Deyst, J. P.; Paulter, N. P.; Daboczi, T.; Stenbakken, G. N.; Souders, T. M.** A fast-pulse oscilloscope calibration system. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1998, vol. 47, no. 5, p. 1037–1041.
6. **Штарас, С.; Вайнорис, З.; Мартавичюс, Р.; Скудутис, Ю.; Станкунас, Й.** Широкополосные тракты осциллографических электронно-лучевых трубок бегущей волны. Вильнюс: Техника, 1993. 360 с.
7. **Kocinski, S. M.** Analysis and Design of Multi-gigahertz Oscilloscope Deflection Structures. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1991, vol. 38, no. 6, p. 1524–1533.
8. **Dunham, M. E.** Modern Circuit Models for Traveling-Wave Structures with Nearest Neighbor Coupling. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1990, vol. 37, no. 3, p. 862–869.
9. **Singh, A.; Scharer, J. E.; Booske, J. H.; Wöhlbier, J. G.** Second- and Third-Order Signal Predistortion for Nonlinear Distortion Suppression in a TWT. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2005, vol. 52, no. 5, p. 709–717.
10. **Choffrut, A.; Van Veen, B. D.; Booske, J. H.** Traveling Wave Tube-Based LINC Transmitters. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2003, vol. 50, no. 5, p. 1405–1407.
11. **Lin A.T., Lin C. C.** Amplification Mechanism in the Output Section of the Harmonic Multiplying Gyrotron Traveling-Wave Amplifier. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2002, vol. 30, no. 3, Part 1, p. 931–937.
12. **Carter R. G.** Computer Simulation of Intermodulation Distortion in Traveling Wave Tube Amplifiers. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2001, vol. 49, no. 1, p. 178–180.
13. **Smith, C. R.; Armstrong, C. M.; Duthie, J.** The microwave power module: A versatile RF building block for high power transmitters. *Proc. IEEE*, 1999, vol. 87, p. 717–737.
14. **Booske, J. H., et al.** Accurate Parametric Modeling of Folded Waveguide Circuits for Millimeter-Wave Traveling Wave Tubes. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2005, vol. 52, no. 5, p. 685–694.
15. **Staras, S.** Simulation and Properties of the Twined Helical Deflecting Structure. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2005, vol. 52, no. 6, p. 1222–1225.
16. **Bhattacharjee, S., et al.** Folded Waveguide Traveling-Wave Tube Sources for Terahertz Radiation. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2004, vol. 32, no. 3, p. 1002–1014.
17. **Ostroumov, P. N.; Nolen, J. A.; Sharamentov, S. I.; Novikov-Borodin, A. V.** Beam Intensity Adjustment in the RIA Driver LINAC. *Proceedings of LINAC*, 2004, p. 33–35.
18. **Kurennoy, S. S.; Power, J. F.; Roybal, R. J.; Schrage, D. L.** Progress with SNS Fast Beam Chopper. *Proceedings of the PAC*, 2001, vol. 2, p. 1435–1437.
19. **Kurennoy, S. S.; Power, J. F.** Development of Meander-Line Current Structure for SNS Fast 2.5-MEV Beam Chopper. *Proceedings of EPAC*, 2000, p. 336–338.
20. **Kurennoy, S. S.; Power, J. F.; Schrage, D. L.** Meander-Line Current Structure for SNS Fast Beam Chopper. *Proceedings of the PAC*, 1999, p. 1399–1401.

21. **Freund, H. P.** Three-Dimensional Nonlinear Theory of Helix Traveling Wave Tubes. *IEEE Transactions on Plasma Science*, June 2000, vol. 28, p. 748–759.
22. **Antonsen, T. M. Jr.** Advances in Modelling and Simulation of Vacuum Electronic Devices, *Proc. IEEE*, 1999, vol. 87, no. 5, p. 804–838.
23. **Skudutis, J.** *Elektrodinaminės lėtinimo-kreipimo sistemos. Teorija. Savybės. Projektavimas: habilitacinis darbas.* Vilnius, 1999. 101 p.
24. **Kory, C. L.; Dayton, J. A.** Accurate Cold-Test Model of Helical TWT Slow-Wave Circuits. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1998, vol. 45, no. 4, p. 966–971.
25. **Kory, C. L.; Dayton, J. A. Jr.** Computational Investigation of Experimental Interaction Impedance Obtained by Perturbation for Helical Traveling-Wave Tube Structures. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1998, vol. 45, no 9, p. 2063–2071.
26. **Martavičius, R.** *Elektrodinaminės planarinės lėtinimo sistemos plačiajuosčiams elektroniniams prietaisams.* Vilnius: Technika, 1996. 264 p.
27. **Freund, H. P.; Zaidman, E. G.; Antonsen, T. M. Jr.** Theory of Helix Traveling Wave Tubes with Dielectric and Vane Loading. *Physics of Plasmas*, 1996, vol. 3, p. 3145–3161.
28. **Urbanavičius, V.** *Meandrinių vėlinimo linijų analizė ir projektavimas: daktaro disertacija.* Vilniaus technikos universitetas. Vilnius, 1995. 166 p.
29. **Kirvaitis, R.** *Elektrodinaminės vėlinimo linijos.* Vilnius: Technika, 1994. 216 p.
30. **Daškevičius, V.** *Spiralinių vėlinimo linijų analizė ir projektavimas: daktaro disertacija.* Vilnius: Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Vilnius, 2000. 91 p.
31. **Jurjevas, A.** *Meandrinių sistemų analizė ir automatizuotas projektavimas: daktaro disertacija.* Vilnius: Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Vilnius, 2001. 145 p.
32. **Gilmour, Jr., A. S.** *Principles of Traveling Wave Tubes.* Boston: Artech House, 1994. 375 p.
33. **Goebel, D. M., et al.** Development of Linear Traveling-Wave Tubes for Telecommunications Applications. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2001, vol. 48, no. 1, 74–81.
34. **Rashed-Mohassel, J.** The Radiation Characteristics of a Resonant Meander Line Section as a Monopole. *Microwave and Optical Technology Letters*, 1991, vol. 45, no. 12, p. 537–540.
35. **Хансперджер, Р.** *Интегральная оптика: Теория и технология.* Пер. с англ. Москва: Мир, 1985. 384 с.
36. **Becker, R. A.; Leonberger, F. J.** 2-bit 1Gsample/s Electrooptic Guided-Wave Analog-to-Digital Converter. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1982, vol. QE-18, no. 10, p. 1411–1413.
37. **Leonberger, F. J.; Woodward, C. E.; Becker, R. A.** A 4-bit 828megsample/sec electrooptic guided-wave analog-to-digital converter. *J. Appl. Lett.*, 1982, vol. 40, p. 565–568.
38. **Тесленко, Л. Ф.; Иванова, А. В.; Светликина И. А.; Семенева, К. Б.** *Замедляющие системы. Часть III: обзоры по электронной технике. Электроника СВЧ, Вып. 16 (510), 1977, 114 с.*
39. **Шкунов, В. А.; Семеник, Г. И.** *Широкополосные осциллографические трубки и их применение.* Москва: Энергия, 1976. 128 с.
40. **Taylor, H. F.** An Electrooptic Analog-to-Digital Converter. *Proc. IEEE*, 1975, vol. 63, no. 10, p. 1524–1525.
41. **Fooks, E. H.; Zakarevičius, R. A.** *Microwave Engineering Using Microstrip Circuits.* Prentice Hall, 1990. 334 p.
42. **Eidukevičius, G.; Kajackas, A.** *Radioelektronikos pagrindai.* Vilnius: Mintis, 1974. 300 p.
43. **Жигарев, А. А.** *Электронная оптика и электронно-лучевые трубки.* Москва: Высшая школа, 1972. 540 с.
44. **Вайнорис, З.; Кирвайтис, Р.; Штарас, С.** *Электродинамические задерживающие и отклоняющие системы.* Вильнюс: Мокслас, 1986. 266 с.
45. **Штарас, С.** Модель сигнального тракта и коэффициент передачи электронно-лучевой трубки бегущей волны. *Научные труды: Радиоэлектроника*, 1986, т. 22, № 1, с. 70–83.
46. **Чайко, Ю. В.; Губанова, Л. И.; Михеева, В. В.** СВЧ осциллографическая трубка с полосой пропускания 5 ГГц. *Электронная промышленность*, 1971, № 4, с. 49.

47. **Andriex, G.; Loty, C.** A High Speed Oscilloscope for Real Time Use. *Philips technical review*, 1969, vol. 30, p. 256–261.
48. **Dionne, N. J.** Harmonic Generation in Octave Bandwidth Traveling Tubes. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1970, vol. ED-17, p. 365–372.
49. **Павлов, С. И.; Топчиев, Г. М.** Электронные нуль-индикаторы для компенсационных измерений импульсных напряжений. *ПТЭ*, 1969, № 6, с. 103–106.
50. **Силин, Р. А.; Сазонов В. П.** *Замедляющие системы*. Москва: Сов. радио, 1968. 632 с.
51. **Rowe J. E.** A Large-Signal Analysis of the Traveling Wave Amplifier – Theory and General Results, *IRE Transactions on Electron Devices*, 1956, vol. ED-3, p. 39–57.
52. **Pierce, J. R.** *Traveling Wave Tubes*. New York: Van Nostrand, 1950.
53. **Иванов, В. Н.** Волны в некоторых спиральных сложной формы. *Радиотехника и электроника*, 1966, т. 11, № 9, с. 1700–1701.
54. **Тараненко, З. И.; Трохименко, Я. К.** *Замедляющие системы*. Киев, 1965. 307 с.
55. **Брыков, В. С.** Основы теории спиральной эллиптической линии задержки. *Изв. Вузов СССР. Радиотехника*, 1961, т. 4, № 5, с. 185–189.
56. **Вайнштейн, Л. А.** *Электромагнитные волны*. Москва: Сов. радио, 1957. 581 с.
57. **Pierce, J. R.; Field, L. M.** Theory of Beam Type Traveling-Wave Tubes. *Proc. IRE*, February 1947, vol. 35, no. 2, p. 111–123.
58. **Blewett, S. P.; Rubel, S. H.** Video delay lines. *Proc. IRE*, 1947, vol. 35, no. 12, p. 1580–1584.
59. **Kallmann, H. E.** Equalized delay lines. *Proc. IRE*, 1946, vol. 34, no. 9, p. 646–657.
60. **Dayton, Jr., J. A., et al.** Diamond-Studded Helical Traveling Wave Tube. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2005, vol. 52, no. 5, p. 695–701.
61. **Kattan, P.** *MATLAB Guide to Finite Elements: An Interactive Approach*. Berlin, 2003. 385 p.
62. **Monk, P.** *Finite Element Methods for Maxwell's Equations*. Oxford, 2003. 336 p.
63. **Jin, J.** *The Finite Element Method in Electromagnetics*. New York, 2002. 753 p.
64. **Portela, A.; Charafi, A.** *Finite Elements Using Maple - A Symbolic Programming Approach*. Berlin: Springer, 2002. 325 p.
65. **Taflove, A.; Hagness, S.** *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*. Boston, 2000. 878 p.
66. **Kleiza, A.** *Nevienalyčių elektrodinaminių sistemų tyrimas: daktaro disertacija*. Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Vilnius, 2000. 139 p.
67. **Freund, H. P.** Nonlinear Theory of Helix Traveling Wave Tubes in the Frequency Domain. *Physics of Plasmas*, 1999, vol. 6, p. 3633–3646.
68. **Kretienstein, B.; Schuhmann, R.; Thoma, P.; Weiland, T.** The Perfect Boundary Approximation Technique Facing the Big Challenge of High Precision Field Computation. *Proceedings of LINAC*, August 1998, p. 860–862.
69. **Helstine, M.** Algorithms for High-Precision Finite Differences. *Dr. Dobb's Journal*, May 1998, p. 52–58.
70. **Huang, C.; You, C.** Analysis and Design of Inhomogeneous Coupled-Stripline Microwave Bandpass Filters. *Microwave Journal*, September 1998, p. 114–124.
71. **Silvester, P. P.; Ferrari, R. L.** *Finite Elements for Electrical Engineers*. New York: Cambridge University Press, 1996. 544 p.
72. **Rizvi, M.; LoVetri, J.** Modelling and Reduction Crosstalk on Coupled Microstrip Line structures and multichip modules: An FDTD approach. *International Journal Microwave and Millimetre-Wave Computer-Aided Engineering*, 1996, vol. 6, p. 58–68.
73. **Sadiku, M.** *Elements of Electromagnetics*. Oxford University Press, 1995. 821 p.
74. **Joubert J.** A Moment Method Analysis of a Folded E-Plane Short in Rectangular Waveguide. *1994 Microwave and Guided Wave Letters*, July 1994, p. 223–225.
75. **Nannapaneni, N. R.** *Elements of Engineering Electromagnetics*. Englewood Cliffs: Prentice Hall Inc., 1994.

76. **Paul, C. R.** Incorporation of Terminal Constraints in the FDTD Analysis of Transmission Lines. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1994, vol. 36, p. 85–91.
77. **Davidovitz, A. R.; Wu, Z.** Semi-Discrete Finite Element Method Analysis of Arbitrary Microstrip Elements-Static Solution. *1993 Transactions on Microwave Theory and Techniques*, April 1993, p. 680–686.
78. **Cella, M. A.; Gray, W. G.** *Numerical Methods for Differential Equations*. New Jersey: Prentice Hall, 1992. 433 p.
79. **Feix, N.; Labande, M.; Jecko, B.** Harmonical Characterisation of a Microstrip via the Finite Difference Time Domain Method. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1992, vol. 40, p. 955–961.
80. **Bi, Z.; Wu, K.; Wu, C.; Litva, J.** A Dispersive Boundary Condition for Microstrip Component Analysis Using the FDTD Method. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1992, vol. 40, p. 744–776.
81. **Фуско, В.** *СВЧ цепи. Анализ и автоматизированное проектирование*. Москва, 1990. 288 с.
82. **Moore, J.; Ling, H.** Characterisation of a 90° Microstrip Bend with Arbitrary Miter via Time-Domain Finite Difference Method. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1990, vol. 38, p. 405–410.
83. **Fang, J.; Zhang, X.; Mei, K. K.; Liu, Y.** Calculations of the Dispersive Characteristics of Microstrips by the Time-Domain Finite Difference Method. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1989, vol. 36, p. 1947–1957.
84. **Balanis, C. A.** *Advanced Engineering Electromagnetics*. New York: Wiley&Sons, 1989.
85. **Zhang, X.; Mei, K. K.** Time-Domain Finite Difference Approach to the Calculation of the Frequency-Dependent Characteristics of Microstrip Discontinuities. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1988, vol. 36, p. 263–267.
86. **Fang, J.; Zhang, X.; Mei, K. K.** Dispersion Characteristics of Microstrip Lines in the Vicinity of a Coplanar Ground. *Electronics Lett.*, 1987, vol. 23, p. 2154–2165.
87. **Pantic, Z.; Mittra, R.** Quasi-TEM Analysis of Microwave Transmission Lines by the Finite-Element Method. *1986 Transactions on Microwave Theory and Techniques*, November 1986, p. 1096–1103.
88. **Weiland, T.** On the Unique Numerical Solution of Maxwellian Eigenvalue Problems in Three Dimensions. *Particle Accelerators*, 1985, vol. 17, p. 227–242.
89. **Ney, M. M.** Method of Moments as Applied to Electromagnetic Problems. *1985 Transactions on Microwave Theory and Techniques*, October 1985, p. 972–980.
90. **Weiland, T.** On the Numerical Solution of Maxwell's Equations and Applications in the Field of Accelerator Physics. *Particle Accelerators*, 1984, vol. 15, p. 245–292.
91. **Moore J., Pizer R.** *Moment Methods in Electromagnetics*. New York: Wiley, 1984.
92. **Delfino, B.** A Contribution to High Precision Numerical Computation Laplacian Fields. *Preprints of International Conference on Numerical Methods in Electric and Magnetic Field Problems*, 1976, p. 4–14.
93. **Harrington, R. F.** *Field Computation By Moment Methods*. New York: Macmillan, 1968.
94. **de Buda, R. G.** A Method of Calculating the Characteristic Impedance of a Strip Transmission Line to a Given Degree of Accuracy. *1958 Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1958, p. 440–446.
95. **Aloisio, M.; Waller, P.** Analysis of Helical Slow-Wave Structures for Space TWTs Using 3-D Electromagnetic Simulators. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2005, vol. 52, no. 5, p. 749–754.
96. **Antonsen, Jr., T. M.; Chernin, D. P.; Cooke, S. J.; Levush, B.** Spurious Reflection of Space Charge Fields in TWTAs. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2005, vol. 52, no. 5, p. 755–763.

97. **Cooke, S. J.; Chia-Lie, Chang; Antonsen, Jr., T. M.; Chernin, D. P.; Levush, B.** Three-Dimensional Modeling of AC Space Charge for Large-Signal TWT Simulation. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2005, vol. 52, no. 5, p. 764–773.
98. **Aloisio, M.; Waller, P.** 3D Analysis of Helical Slow-Wave Structures for Space TWTs: Critical Comparison of Ansoft HFSS and CST Microwave Studio. *5th IEEE International Vacuum Electronics Conference, IVEC*, 2004, p. 352–353.
99. **Skudutis, J.; Daškevičius, V.** Spiralinės lėtinimo sistemos savybių tyrimas programų paketu „MicroWave Studio“. *Elektronika ir elektrotechnika*, Kaunas, 2006, nr. 1(65), p. 38–42.
100. **Wessel-Berg, T.** CAD of Tape Helix Circuits for Traveling Wave Tubes by Convolution Methods. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2004, vol. 51, no. 11, p. 1918–1927.
101. **Skudutis, J.; Daškevičius, V.** Ekranų įtakos spiralinės sistemos savybėms tyrimas. *Elektronika ir elektrotechnika*, Kaunas, 2003, nr. 6(48), p. 22–27.
102. **Raina, S.; Kumar, L.** Comparison of Dispersion and Impedance Characteristics of Helix Slow Wave Structures from Analytical Models and MAFIA. *4th IEEE International Vacuum Electronics Conference*, 2003, p. 75–76.
103. **Reiche, E.; Uhlmann, F. H.** Application of the FDTD for the Optimization of the Broad-Band Transitions between Different Types of the Transmission Lines. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2002, vol. 28, no 2, p. 593–596.
104. **Chevalier, C. T.; Herrmann, K. A.; Kory, C. L.; Wilson, J. D.; Cross, A. W.** A Comparison of Three-Dimensional Simulations of Traveling Wave Tube Cold-Test Characteristics Using CST Microwave Studio and Mafia. *Proceedings of IVEC*, April 2002, p. 15–16.
105. **Begum, R.; Legarra, J.** Application of 3D Microwave Design Tools to Predict Cold-Test and Hot-Test Characteristics of a Helix-TWT. *Abstract of IVEC 2002 Proceedings*, April, 2002.
106. **Chernin, D., et al.** A 3-D Multi-Frequency Large Signal Model for Helix Traveling Wave Tubes. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2001, vol. 48, no. 1, p. 3–11.
107. **Coco, S., et al.** COCA: A Novel 3-D FE Simulator for the Design of TWTs Multistage Collectors. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2001, vol. 48, no 1, p. 24–1.
108. **Chernin, D.; Antonsen, Jr., T. M.; Levush, B.; Whaley, D. R.** A Three-Dimensional Multifrequency Large Signal Model for Helix Traveling Wave Tubes. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2001, vol. 48, no. 1, p. 3–11.
109. **Cooke, S. J., et al.** CTLSS - an Advanced Electromagnetic Simulation Tool for Designing High-Power Microwave Sources. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2000, vol. 28, no. 3, p. 841–866.
110. **Daškevičius, V.; Skudutis, J.** Spiralinės vėlinimo sistemos savybių tyrimas Microwave Office 2000 paketu. *Elektronika ir elektrotechnika*, Kaunas, 2000, Nr. 2(25), p. 30–33.
111. **Danly, B. G., et al.** Development and Testing of a High-Average Power 94-GHz Gyroklystron. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2000, vol. 28, no. 3, p. 713–726.
112. **Abe, D. K., et al.** A Comparison of L-Band Helix TWT Experiments with CHRISTINE, a 1-D Multi-Frequency Helix TWT Code. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2000, vol. 28, no. 3, p. 576–587.
113. **Kory, C. L.; Dayton, Jr., J. R.** Effect of Helical Slow-Wave Circuit Variations on TWT Cold-Test Characteristics. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1998, vol. 45, no. 4, p. 972–976.
114. **Begum, R., et al.** Prediction of Cold-Test and Hot-Test Characteristics of a High Efficiency Linear C-Band Helix TWT Using HFSS, CTLSS, Christine 1-D/3-D. *5th IEEE International Vacuum Electronics Conference, IVEC*, April 2004, p. 30–131.
115. **Kory, C. L.** Three Dimensional Simulation of Helix Traveling-Wave Tube Cold-Test Characteristics Using MAFIA. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1996, vol. 43, no. 8, p. 1317–1319.
116. **Morey, I. J.; Birdsall, C. K.** Traveling-Wave-Tube Simulation: The IBC Code. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1990, vol. 18, no. 3, p. 482–489.

117. **MacGregor, D. M.** *Two-Dimensional Nonlinear Multi-signal Helix Traveling-Wave Amplifier Computer Program*. Ann Arbor: Electrocon Int., 1986.
118. **Dayton, Jr., J. A.; Kosmahl, H. G.; Ramins, P.; Stankiewicz, N.** Analytical Prediction and Experimental Verification of TWT and Depressed Collector Performance Using Multi-Dimensional Computer Programs. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1979, vol. ED-26, p. 1589–1598.
119. **Potapov, J.** CST Microwave Studio 5.0. *EDA Expert #8 - CHIP NEWS #7*, 2004, p. 36–41.
120. <http://www.remcom.com> (žiūrėta: 2005-10-15)
121. <http://www.appwave.com/products/mwoffice> (žiūrėta: 2004-03-18)
122. <http://www.vectorfields.com> (žiūrėta: 2004-09-24)
123. <http://www.zeland.com> (žiūrėta: 2004-09-24)
124. <http://www.speag.com> (žiūrėta: 2006-01-03)
125. <http://www.semcad.com> (žiūrėta: 2006-01-03)
126. <http://www.femlab.com> (žiūrėta: 2005-03-20)
127. <http://www.ansoft.com> (žiūrėta: 2005-03-20)
128. <http://www.cst.com> (žiūrėta: 2005-03-20)
129. **Correl, R. E.** *Traveling Wave Push-Pull Electron Beam Deflection Structure Having Voltage Gradient Compensation*. US Patent, 4 812 707. 1989.
130. **Tobari, T.** *Traveling Wave Deflection System Having Helical Conductors Coiled on Insulating Cores of a Specifiable Specific Dielectric Constant*. US Patent, 6 184 615. 2001.
131. **Hagen, E. C.; Hudson, C. L.** *Orthogonally Interdigitated Shielded Serpentine Traveling Wave Cathode Ray Tube Deflection Structure*. US Patent, 5 436 524. 1995.
132. **Hudson, C. L.; Spector, J.** *Shielded Serpentine Traveling Wave Tube Deflection Structure*. US Patent, 5 376 864. 1994.
133. **Dunham, M. E.; Hudson C. L.** *Cavity Resonance Absorption in Ultra-High Bandwidth CRT Deflection Structure by a Resistive Load*. US Patent, 5 210 464. 1993.
134. **Tobari, T.; Akitsuki, O.; Takano, K.** *Travelling Wave Deflection System in Cathode-Ray Tube with Conducting Core on Helical Conductor*. US Patent, 5 038 075. 1991.
135. **Norris, N. J.; Hudson, C. L.** *Shielded Helix Traveling-Wave Cathode-Ray Tube Deflection Structure*. US Patent, 5 172 029. 1992.
136. **Plazza, R. E.; Janko, B.** *Distributed Deflection Structure Employing Dielectric Support*. US Patent, 3 849 695. 1974.
137. **Cristie, A. B.; Correll, R. E.** *Traveling Wave Deflector for Electron Beams*. US Patent, 4 093 891. 1978.
138. **Guillaume, A.; Loty, Ch.** *Perfectionnements aux lignes a retard*. France Brevet d'invention, 1 465 559.
139. **Вайнорис, З. А.; Мартавичюс, Р. Л.; Шкунов, В. А.; Штарас, С. С.** *Отклоняющая система бегущей волны*. Описание изобретения к авторскому свидетельству, 449 391. 1972.
140. **Скудутис, Ю.** *Анализ литературы и поиск перспективных конструкций замедляюще-отклоняющих систем трубок бегущей волны*. 1985, № 1463-ЛИ, 25 с.
141. **Himmelbauer, E. E.** *Design Considerations for Wide-Band Oscilloscope Tube with Scan Magnification*. Philips Research Reports Supplements, 1969, no. 1, 12 p.
142. **Štaras, S.; Kleiza, A.** Elektrinio lauko lėtinimo ir kreipimo sistemoje analizė. *Elektronika ir elektrotechnika*, Kaunas, 2000, Nr. 1(24), p. 12–15.
143. **Daškevičius, V.; Skudutis, J.** Investigation of the Helical Delay System Using Microwave Office 2000 Package. *Electronics and Communications*, Kiev, 2000, no. 8, p. 118–121.
144. **Daškevičius, V.; Skudutis, J.** Bendraašių spiralių lėtinimo sistemos savybių tyrimas. *Elektronika ir elektrotechnika*, Kaunas, 2001, Nr. 5(34), p. 32–37.
145. **Seilius, A.** *Elektroninių matavimų metrologijos pagrindai*. Vilnius: Technika, 2003. 271 p.
146. **Bell, D. A.** *Electronic instrumentation and measurements*. New Jersey: Prentice Hall, 1994. 451 p.

147. Вайнорис, З.; Вайтекунас, Ф. Экспериментальное исследование сверхширокополосных спиральных плавнорегулированных линий задержки. *Научные труды: Радиоэлектроника*, 1969, т. 5, с. 341–348.
148. Štaras, S.; Kleiza, A. Lovelinių lėtinimo sistemų analizė ir savybės. *Elektronika ir elektrotechnika*, Kaunas, 1999, nr. 2(20), p. 38–41.
149. Chernin, D.; Antonsen, Jr., T. M.; Levush, B. Exact Treatment of the Dispersion and Beam Interaction Impedance of a Thin Tape Helix Surrounded by a Radially Stratified Dielectric. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1999, vol. 46, no. 7, p. 1472–1483.
150. D'Agostino, S. Sensitivity Analysis of TWT's Small Signal Gain Based on the Effect of Rod Shape and Dimensions. *IEEE Transactions Electron Devices*, 2000, vol. 47, no. 7, p. 1457–1462.
151. D'Agostino, S.; Emma, F.; Paoloni, C. Accurate Analysis of Helix Slow-Wave Structures. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1998, vol. 45, no. 7, p. 1605–1613.
152. Jain, K. P.; Basu, B. N. The Inhomogeneous Dielectric Loading Effects of Practical Helix Supports on the Interaction Impedance of the Slow-Wave Structure of a TWT. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1992, vol. 39, no. 3, p. 727–733.
153. Greninger, P. Tape Helix Perturbation Including 3-D Dielectrics for TWTs. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2001, vol. 48, no. 1, p. 12–23.
154. Onodera, T.; Raub, W. Phase Velocity Dispersion of a Generalized Metal-Segment-Loaded Helix as Used in Broad-Band Traveling-Wave Tubes. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1998, vol. 35, no. 4, p. 533–538.
155. Ghosh, S.; Jain, P. K.; Basu, B. N. Rigorous Tape Analysis of Inhomogeneously-Loaded Helical Slow-Wave Structures. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1997, vol. 44, no. 7, p. 1158–1168.
156. Cain, W. N.; Grow, R. W. The Effects of Dielectric and Metal Loading on the Dispersion Characteristics for Contrawound Helix Circuits Used in High-Power Traveling-Wave Tubes. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1990, vol. 37, no. 6, p. 1566–1578.
157. Лошаков, Л. Н. О расчете параметров экранированной спиральной линии при наличии диэлектрических опор. *Радиотехника*, 1972, т. 27, № 8, с. 32–39.
158. Лошаков, Л. Н.; Ольдерогге, Е. Б. О распространении медленных электромагнитных волн вдоль спирали при наличии диэлектрических опор. *Радиотехника и электроника*, 1968, т. XIII, № 1, с. 61–68.
159. Skudutis, J.; Daškevičius, V. Lėtinimo ir kreipimo sistemos įėjimo varžos tyrimas. *Elektronika ir elektrotechnika*, Kaunas, 2002, Nr. 7(42), p. 13–17.
160. Мартавичюс, Р.; Чуплинскас, А.; Штарас, С. Оценка времени нарастания переходной характеристики осциллографической трубки бегущей волны. *Научные труды: Радиоэлектроника*, 1987, № 23(2), с. 62–69.
161. Гайвялис, А.; Штарас, С. Частотнозависимые нелинейные искажения в электронно-лучевых трубках бегущей волны. *Научные труды: Радиоэлектроника*, 1991, № 27(2), с. 100–106.
162. Гайвялис, А.; Штарас, С. К вопросу о искажениях формы импульсных сигналов в ЭЛТБ. *Научные труды: Радиоэлектроника*, 1991, № 27(2), с. 95–99.
163. Штарас, С.; Скудутис, Ю. Входное сопротивление спиральной системы. *Радиотехника и электроника*, 1997, т. 42, № 4, с. 395–397.
164. Сазонов, В. П. Распределенные параметры спиральных замедляющих систем. *Вопросы радиоэлектроники: Сер. 1: Электроника*, 1960, № 7, с. 35–54.
165. Белуга, И. Ш. К расчету полей поперечных электромагнитных волн в штыревых замедляющих системах. *Радиофизика*, 1959, т. 2, № 16, с. 84–93.
166. Sichak, W. Coaxial Line with Helical Inner Conductor. *Proc. IRE*, 1954, vol. 42, no. 9, p. 1315–1319.
167. Лошаков, Л. Н. О влиянии диэлектрических опор на фазовую скорость пространственных гармоник в замедляющей системе с периодической структурой. *Радиотехника*, 1968, т. 23, № 4, с. 85–89.

168. **Jonson, C. C.** Impedance and Dispersion Characteristic of the Flattened Helix. *IRE Transactions*, 1959, vol. ED-6, no. 4, p. 189–194.
169. **Ширман, Я. Д.; Вайнорис, З. А.** Система анизотропно проводящих плоскостей как простейшая модель линии задержки с распределенными параметрами. *Радиотехника и электроника*, 1959, т. 4, № 8, с. 1368–1376.
170. **Гупта, К.; Гардж, Р.; Чадха, Р.** *Машиное проектирование СВЧ устройств*. Пер. с англ. Москва, 1987. 432 с.
171. **Weiss, J. A.** Dispersion and Field Analysis of Microstrip Meander-Line Slow-Wave Structure. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1974, vol. MTT-22, p. 1194–1201.
172. **Lindell, I. V.** On the Quasi-TEM Modes in Inhomogeneous Multiconductor Transmission Lines. *1981 Transactions on Microwave Theory and Techniques*, August 1981, p. 812–817.
173. **Garb, K.; Kastner, R.** Characteristic Impedance of a Rectangular Double-Ridged TEM Line. *1997 Transactions on Microwave Theory and Techniques*, April 1997, p. 554–557.
174. **Kniševskaja, L.; Tamošiūnienė, M.; Tamošiūnas, V.; Šugurovas V.** Mikrojuostelinių linijų su puslaidininkiniais ir dielektriniais padėklais skaitinis tyrimas. *Elektronika ir elektrotechnika*, Kaunas, 2003, Nr. 2(44), p. 22–25.
175. **Itoh, T.; Pelosi, G.; Silvester, P. S.** *Finite element software for microwave engineering*. New York: Wiley&Sons, 1996. 478 p.
176. **Kleiza, A.; Štaras, S.** Daugialaidžių linijų banginių varžų skaičiavimas. *Elektronika ir elektrotechnika*, Kaunas, 1999, Nr. 4(22), p. 41–44.
177. **Honey, R. C.** A Traveling-wave Electron Deflection System. *IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1954, vol. 2, no. 2, p. 2–9.
178. **Вайнорис, З.; Мацейка, К.; Штарас, С.** Распределение электрического поля в плоской двухэкранной спиральной отклоняющей системе. *Радиотехника и электроника*, 1970, т. 15, № 6, с. 1314–1315.
179. **Štaras, S.** Models for Simulation of Travelling-Wave Deflection Structures. *Elektronika ir elektrotechnika*, Kaunas, 2000, Nr. 2(25), p. 23–29.
180. **Fusko, V. F.** *Microwave circuits. Analysis and computer-aided design*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1987. 288 p.
181. **Staras, S.** Simulation and Properties of the Twined Helical Deflecting Structure. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2002, vol. 49, no. 10, p. 1826–1830.
182. **Мацейка, К. Ю.; Малишаускас, В. В.** Резонансы в двухэкранных спиральных замедляющих системах. *Радиоэлектроника*, 1979, т. 15, № 2, с. 112–117.

Autoriaus publikacijų sąrašas

183. **Burokas, T.** Dvipradės spiralinės sistemos analizė. *Ketvirtoji jaunųjų mokslininkų konferencija "Lietuva be mokslo - Lietuva be ateities": Konferencijos medžiaga*, 2000, p. 11–16.
184. **Štaras, S.; Burokas, T.** Model, Analysis and Properties of the Twined Helical Structure. *Elektronika ir elektrotechnika*, Kaunas, 2001, Nr. 5(34), p. 21–24.
185. **Štaras, S.; Burokas, T.** Elektrinis laukas bėgančiosios bangos kreipiamosiose sistemose. *Elektronika ir elektrotechnika*, Kaunas, 2002, Nr. 2(37), p. 55–59.
186. **Štaras, S.; Burokas, T.** Simulation of the Twined Helical Deflecting System. *Baltic Electronics Conference, BEC'2002: Conference Proceedings*, 2002, p. 43–46.
187. **Štaras, S.; Burokas, T.** Nevienalyčių spiralinių sistemų savybės. *Elektronika ir elektrotechnika*, Kaunas, 2003, Nr. 1(43), p. 17–20.
188. **Štaras, S.; Burokas, T.** Netiesiniai iškreipimai bėgančiosios bangos kreipimo sistemose. *Elektronika ir elektrotechnika*, Kaunas, 2003, Nr. 6(48), p. 42–47.
189. **Štaras, S.; Burokas, T.** Lėtinimo ir kreipimo sistemų ir jų jungių modeliavimas bei tobulinimas. *Elektronika ir elektrotechnika*, Kaunas, 2004, Nr. 1(50), p. 9–15.
190. **Burokas, T.; Štaras, S.** Laikiklių įtaka spiralinių ir meandrinių sistemų savybėms. *Elektronika ir elektrotechnika*, Kaunas, 2004, Nr. 4(53), p. 22–27.
191. **Štaras, S.; Burokas, T.** Simulation and Properties of Transitions to Traveling-Wave Deflection Systems. *IEEE Transactions on Electron Devices*, July 2004, vol. 51, no. 7, p. 1049–1052.
192. **Štaras, S.; Burokas, T.** Simulation and Properties of Inhomogeneous Helical Systems. *Proceedings of the XIV International Conference on Electromagnetic Disturbances*, 2004, p. 203–206.
193. **Burokas, T.; Štaras, S.** Simulation of the Twined Helical System Containing Inner Shield. *International Scientific Conference UNITECH'04 Proceedings*, Gabrovo, 2004, vol. I, p. 125–129.
194. **Štaras, S.; Burokas, T.** Bėgančiosios bangos elektroninių vamzdžių ir jų signalinių traktų dinaminės charakteristikų tobulinimo galimybės. *Elektronika ir elektrotechnika*, Kaunas, 2005, Nr. 2(58), p. 47–52.
195. **Burokas, T.; Štaras, S.** Nevienalyčių lovelinių sistemų savybės. *Elektronika ir elektrotechnika*, Kaunas, 2005, Nr. 6(62), p. 26–31.
196. **Zemitan, A.; Burokas, T.** Daugialaidžių linijų banginių varžų skaičiavimas baigtinių elementų metodu. *Aštuntoji jaunųjų mokslininkų konferencija "Lietuva be mokslo - Lietuva be ateities": Konferencijos medžiaga*, 2005, p. 56–65.
197. **Burokas, T.; Štaras, S.** Simulation of Traveling-Wave Deflecting Systems and Deflection in Traveling-Wave Cathode-Ray Tubes. *Proceedings of the XV International Conference on Electromagnetic Disturbances*, 2005, p. 99–104.
198. **Burokas, T.; Daskevicius, V.; Skudutis, J.; Štaras, S.** Simulation of the Wide-Band Slow-Wave Structures using Numerical Methods. *Proceedings of the International Conference on „Computer as a Tool“, EUROCON 2005*, 2005, vol. I, p. 848–851.
199. **Štaras, S.; Burokas, T.** Kvazisisimetrinės spiralinės kreipimo sistemos modelis ir savybės. *Elektronika ir elektrotechnika*, Kaunas, 2006, Nr. 2(66), p. 68–73.

1 priedas**Banginių varžų skaičiavimo programa**

```

function pdemodel
[pde_fig,ax]=pdeinit;
pdetool('appl_cb',5);
pdetool('snaon','on');
set(ax,'DataAspectRatio',[1 2.7999999999999994 1]);
set(ax,'PlotBoxAspectRatio',[1 0.66666666666666674 2.6666666666666665]);
set(ax,'XLim',[0 0.75]);
set(ax,'YLim',[0 1.3999999999999999]);
set(ax,'XTick',[ 0,...
    0.050000000000000003,...
    0.100000000000000001,...
    0.150000000000000002,...
    0.200000000000000001,...
    0.25,...
    0.300000000000000004,...
    0.350000000000000003,...
    0.400000000000000002,...
    0.450000000000000001,...
    0.5,...
    0.550000000000000004,...
    0.59999999999999998,...
    0.64999999999999991,...
    0.69999999999999996,...
    0.75,...
    0.79999999999999993,...
    0.84999999999999987,...
    0.89999999999999991,...
    0.94999999999999996,...
    1,...
    1.0499999999999998,...
    1.0999999999999999,...
    1.1499999999999999,...
    1.2,...
]);
set(ax,'YTick',[ 0,...
    0.050000000000000003,...
    0.100000000000000001,...
    0.150000000000000002,...
    0.200000000000000001,...
    0.25,...
    0.300000000000000004,...
    0.350000000000000003,...
    0.400000000000000002,...
    0.450000000000000001,...
    0.5,...
    0.550000000000000004,...
    0.600000000000000009,...
    0.650000000000000002,...
    0.700000000000000007,...
    0.75,...
    0.800000000000000004,...
    0.850000000000000009,...
    0.900000000000000002,...
    0.950000000000000007,...
    1,...
    1.05,...
    1.100000000000000001,...
    1.150000000000000001,...
    1.200000000000000002,...

```

```

1.25,...
1.3,...
1.35000000000000001,...
1.40000000000000001,...
1.45000000000000002,...
1.5,...
1.55,...
1.60000000000000001,...
]);
pdetool('gridon','on');

% Geometry description:
pderect([0 0.65000000000000002 0 0.40000000000000002],'R1');
pderect([0.40000000000000002 0.64999999999999991 0.39999999999999997
0.59999999999999998],'R2');
pdepoly([ 0,...
0.64999999999999991,...
0.64999999999999991,...
0.75,...
0.75,...
0,...
],...
[ 0.60000000000000009,...
0.60000000000000009,...
1,...
1,...
1.3999999999999999,...
1.3999999999999999,...
],...
'P1');
set(findobj(get(pde_fig,'Children'),'Tag','PDEEval'),'String','R1+R2+P1')

% Boundary conditions:
pdetool('changemode',0)
pdesetbd(14,...
'neu',...
1,...
'0',...
'0')
pdesetbd(13,...
'neu',...
1,...
'0',...
'0')
pdesetbd(12,...
'dir',...
1,...
'1',...
'0')
pdesetbd(11,...
'dir',...
1,...
'1',...
'0')
pdesetbd(10,...
'dir',...
1,...
'1',...
'0')
pdesetbd(8,...
'dir',...
1,...
'1',...
'1')

```

```

pdesetbd(6,...
'dir',...
1,...
'1',...
'1')
pdesetbd(5,...
'dir',...
1,...
'1',...
'0')
pdesetbd(4,...
'neu',...
1,...
'0',...
'0')
pdesetbd(3,...
'dir',...
1,...
'1',...
'0')
pdesetbd(2,...
'dir',...
1,...
'1',...
'1')
pdesetbd(1,...
'dir',...
1,...
'1',...
'0')

% Mesh generation:
setupprop(pde_fig,'Hgrad',1.3);
setupprop(pde_fig,'refinemethod','regular');
pdetool('initmesh')
pdetool('refine')
pdetool('refine')
pdetool('refine')
pdetool('refine')

% PDE coefficients:
pdeseteq(1,...
'8.85419e-12!8.85419e-12!8.85419e-12',...
'0.0!0.0!0.0',...
'0!0!0',...
'1.0!1.0!1.0',...
'0:10',...
'0.0',...
'0.0',...
'[0 100]')
setupprop(pde_fig,'currparam',...
['8.85419e-12!8.85419e-12!8.85419e-12';...
'0!0!0' ''])

% Solve parameters:
setupprop(pde_fig,'solveparam',...
str2mat('0','1000','10','pdeadworst',...
'0.5','longest','0','1E-4','','fixed','Inf'))

% Plotflags and user data strings:
setupprop(pde_fig,'plotflags',[1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 0 0 1]);
setupprop(pde_fig,'colstring','');
setupprop(pde_fig,'arrowstring','');
setupprop(pde_fig,'deformstring','');

```

```

setupprop(pde_fig, 'heightstring', '');

% Solve PDE:
pdetool('solve')

pde_fig=findobj(allchild(0), 'flat', 'Tag', 'PDETool');

if isempty(pde_fig)
    error('PDE Toolbox GUI not active.')
end

u = get(findobj(pde_fig, 'Tag', 'PDEPlotMenu'), 'UserData');
l =get(findobj(pde_fig, 'Tag', 'winmenu'), 'UserData');
h=findobj(get(pde_fig, 'Children'), 'flat', 'Tag', 'PDEMeshMenu');
hp=findobj(get(h, 'Children'), 'flat', 'Tag', 'PDEInitMesh');
he=findobj(get(h, 'Children'), 'flat', 'Tag', 'PDERefine');
ht=findobj(get(h, 'Children'), 'flat', 'Tag', 'PDEMeshParam');
p=get(hp, 'UserData');
e=get(he, 'UserData');
t=get(ht, 'UserData');
u;
p;
e;
t;
%skaiciuojame trikampių plotus
[ar]=pdetrng(p,t);
%randame Ex ir Ey gradientu dedamasias kiekvienam trikampiui
[ux,uy] = pdegrad(p,t,u);
%randame Ex ir Ey kvadratu suma (E modulio kvadratas)
[gr]=(ux.^2 + uy.^2);
%randame kiekviename trikampyje sukaupta energija
[E]=8.854*1e-12*ar.*gr;
%susumuojame visa sukaupta energija ir gauname talpa
C0=2*sum(E);

ZB=1/(3e+8)/C0

% ////////////////////////////////////////
% SKAICIUOJAME BANGINE VARZA ESANT NEVIENALYCIAM DIELEKTRIKUI
% ////////////////////////////////////////

% PDE coefficients:
pdeseteq(1,...
'0.000000000006197933!0.00000000002656257!0.00000000002656257',...
'0.0!0.0!0.0',...
'0!0!0',...
'1.0!1.0!1.0',...
'0:10',...
'0.0',...
'0.0',...
'[0 100]')
setupprop(pde_fig, 'currparam',...
['0.000000000006197933!0.00000000002656257!0.00000000002656257';...
'0!0!0'
])

% Solve parameters:
setupprop(pde_fig, 'solveparam',...
str2mat('0', '1000', '10', 'pdeadworst',...
'0.5', 'longest', '0', '1E-4', '', 'fixed', 'Inf'))

% Plotflags and user data strings:
setupprop(pde_fig, 'plotflags', [1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 0 0 1]);
setupprop(pde_fig, 'colstring', '');
setupprop(pde_fig, 'arrowstring', '');

```

```

setupprop(pde_fig, 'deformstring', '');
setupprop(pde_fig, 'heightstring', '');

% Solve PDE:
pdetool('solve')

pde_fig=findobj(allchild(0), 'flat', 'Tag', 'PDETool');

if isempty(pde_fig)
    error('PDE Toolbox GUI not active.')
end

u = get(findobj(pde_fig, 'Tag', 'PDEPlotMenu'), 'UserData');
l =get(findobj(pde_fig, 'Tag', 'winmenu'), 'UserData');
h=findobj(get(pde_fig, 'Children'), 'flat', 'Tag', 'PDEMeshMenu');
hp=findobj(get(h, 'Children'), 'flat', 'Tag', 'PDEInitMesh');
he=findobj(get(h, 'Children'), 'flat', 'Tag', 'PDERefine');
ht=findobj(get(h, 'Children'), 'flat', 'Tag', 'PDEMeshParam');
p=get(hp, 'UserData');
e=get(he, 'UserData');
t=get(ht, 'UserData');
u;
p;
e;
t;

%skaiciuojame trikampių plotus
[ar]=pdetrg(p,t);
%randame Ex ir Ey gradientu dedamasias kiekvienam trikampiui
[ux,uy] = pdegrad(p,t,u);
%randame Ex ir Ey kvadratu suma (E modulio kvadratas)
[gr]=(ux.^2 + uy.^2);

aa=size(t,2)
s=t;
eps1=7;
eps2=3;
eps3=3;

% I SRITIS //////////////////////////////////////

for k=1:aa;
s(5,k)=ar(1,k);
s(6,k)=gr(1,k);
if s(4,k)>2;
    s1(1,k)=s(5,k);
    s2(1,k)=s(6,k);
else
    s1(1,k)=0;
    s2(1,k)=0;
end
end

h1=s1.*s2;
%d1=sum(h)
[E1]=eps1*8.85*1e-12*h1;
%susumuojame visa sukaupia energija ir gauname talpa
C1=2*sum(E1);

% II SRITIS //////////////////////////////////////

for k=1:aa;
s(5,k)=ar(1,k);
s(6,k)=gr(1,k);

```

```

if s(4,k)>1
    if s(4,k)<3;
        s3(1,k)=s(5,k);
        s4(1,k)=s(6,k);
    else
        s3(1,k)=0;
        s4(1,k)=0;
    end
end
end

h2=s3.*s4;
%d2=sum(h2)
[E2]=eps2*8.85*1e-12*h2;
%susumuojame visa sukaupia energija ir gauname talpa
C2=2*sum(E2);

% III SRITIS ////////////////////////////////////////

for k=1:aa;
    s(5,k)=ar(1,k);
    s(6,k)=gr(1,k);
    if s(4,k)<2;
        s5(1,k)=s(5,k);
        s6(1,k)=s(6,k);
    else
        s5(1,k)=0;
        s6(1,k)=0;
    end
end
h3=s5.*s6;
%d3=sum(h3)
[E3]=eps3*8.85*1e-12*h3;
%susumuojame visa sukaupia energija ir gauname talpa
C3=2*sum(E3);
C1
C2
C3
Cg=(C1+C2+C3)
ZBg=1/(3e+8)/sqrt(Cg*C0)
end
end

```

2 priedas

Elektronų pluošto kreipimo ir BBEV statinio jautrumo skaičiavimo programa

```

script
clc
clear all
% format long
% Modeliuojamas KS diskretiškumas

diary TWCRT_statika
diary on
disp( ' Programa TWCRT_statika' )
date
% Pradiniai duomenys
wp=1.0      % tarpas tarp KE i_ejime, mm
wg=3.0      % tarpas tarp KE isejime, mm
zn=1.5      % KLE zingsnis, mm
nv=10       % zingsniu_ skaicius
u0=1500     % greitinimo i_tampa, V
le=150      % ekrano nuotolis, mm

u=-65.0     % kreipimo i_tampa, V

% Pakeitus dimensijas
wpm=0.001*wp;
wgm=0.001*wg;
znm=0.001*zn;
lem=0.001*le;
% ypm=0.001*yp;
% ygm=0.001*yg;

% Konstantos
c=2.998e8;
q=1.602e-19;
m=9.11e-31;
pi=4*atan(1);
qm=q/m;

% Apskaiciuoti dydziai
v0=sqrt(2*qm*u0); % el. greitis
klet=c/v0;       % let. koeficientas
tv=znm/v0;       % lekio trukme, s
ts=tv*nv;        % lekio trukme sistemoje, s
te=lem/v0;       % lekio trukme iki ekrano, s
k1=(wgm-wpm)/nv; % wgm=wpm+i*nv

% Prasideda ciklas, i - vijos numeris
for i=1:nv

    % Int(i)=0;
    Tt(i)=1;
    w(i)=wpm+k1/2+(i-1)*k1;
    if i==1
        e(i)=u*Tt(i)/w(i);
        v(i)=1000*qm*e(i)*tv;
        vs(i)=v(i);
        dy(i)=v(i)*tv/2;
        hs(i)=dy(i);
    end
    if i>1

```

```
e(i)=u*Tt(i)/w(i);
v(i)=1000*qm*e(i)*tv;
vs(i)=vs(i-1)+v(i);
dy(i)=vs(i-1)*tv+v(i)*tv/2;
hs(i)=hs(i-1)+dy(i);

end

end
H1=vs(nv)*te          % mmkreipima_
H=(vs(nv)*te+hs(nv))  % mm
S=H/u                 % mm/V
hss=hs(nv)
plot(w)
pause
plot(v)
pause
plot(vs)
pause
plot(dy)
pause
plot(hs)
pause

disp( ' Ar hs(nv)<wg?' )
diary off
end
```

3 priedas**BBEV su nesimetrine sistema pereinamųjų charakteristikų
skaičiavimo programa**

```

script
clc
clear all

% Ivertinami netiesiniai iskraipymai
% Skaičiuojama normuotoji PCh
% Modeliuojamas poslinkio įtampos poveikis pradinei elektronų trajektorijai

diary TWCRT_parabole13
diary on
date
clock
disp( ' Programa TWCRT_parabole' )

% Pradiniai duomenys
wp=1.0      % tarpas tarp KE i_ejime, mm
wg=3.0      % tarpas tarp KE isejime, mm
zn=1.5      % KLE zingsnis, mm
nv=10       % zingsniu_skaicius
u0=1500     % greitinimo i_tampa, V
le=150      % ekrano nuotolis, mm
yp=0.1*wp   % pradine el. koordinate (nuo ekrano), mm
yg=0.9*wg   % pradine el. koordinate KS gale, mm
ygm=0.9*wg  % el. koordinate KS gale, kai yra poslinkio įtampa, mm
vir=3.5     % virsutinis integravimo rezis, =vir*2*pi
nint=100000 % integravimo zingsniu_skaicius
u=65        % kreipimo i_tampa, V

% Pakeitus dimensijas
wpm=0.001*wp;
wgm=0.001*wg;
znm=0.001*zn;
lem=0.001*le;
ypm=0.001*yp;
ygm=0.001*yg;
ygmxm=0.001*ygm;

% Konstantos
c=2.998e8;
q=1.602e-19;
m=9.11e-31;
pi=4*atan(1);
qm=q/m;

% Apskaiciuoti dydziai
v0=sqrt(2*q*u0/m) % el. greitis
klet=c/v0;        % let. koeficientas
tv=znm/v0;        % lekio trukme, s
ts=tv*nv;         % lekio trukme sistemoje, s
te=lem/v0;        % lekio trukme iki ekrano, s
k1=(wgm-wpm)/nv;  % wgm=wpm+i*nv
k2=(ygm-ypm)/nv;  % ygm=ypm+i*nv
k3=(ygmxm-ygm)/nv/nv;
dint=vir*2*pi/nint; % integravimo zingsnis

rz3=zeros(nv,61);

```

```

rz4=zeros(nv,61);
rz5=zeros(nv,61);
rz6=zeros(nv,61);

% Pradines kint. reikšmes
wpvid=wpm+0.5*k1;
ypvid=ypm+0.5*k2+0.25*k3;

for it=1:61
    diary off
    it
    diary on
    t(it)=0.1*(it-30);

    y0(1)=ypvid;
% Prasideda ciklas, i - vijos numeris
    for i=1:nv
        w(i)=wpvid+(i-1)*k1;
        y0(i)=ypvid+(i-1)*k2+(i-1)*(i-1)*k3;

        Int(i,it)=0;
        Tt(i,it)=0;

        if i==1
            y(i,it)=y0(i);
        end
        if i>1
            y(i,it)=y0(i)+hs((i-1),it);
        end

        for j=1:nint
            tet(j)=j*dint;
            tet1(j)=0.5*tet(j);
            kf1(i,j)=(sin(tet1(j)))/(tet1(j));
            kf2(i,j,it)=(w(i)/znm)*tet(j)*cosh(y(i,it)*tet(j)/znm)...
            /sinh(w(i)*tet(j)/znm);
            kf(i,j,it)=kf1(i,j)*kf2(i,j,it);
            kfi(i,j,it)=kf(i,j)*(1/tet(j))*sin(tet(j)*t(it))*dint;
            Int(i,it)=Int(i,it)+kfi(i,j,it);
            Tt(i,it)=0.5+Int(i,it)/pi;
        end

        if i==1
            w1(i)=w(i)-0.5*k1;
            w2(i)=w1(i)+k1;
            wekv(i)=(w2(i)-w1(i))/log(w2(i)/w1(i));
            % Patikslintas greicio skaiciavimas
            e(i,it)=u*Tt(i,it)/wekv(i);

            v(i,it)=qm*e(i,it)*tv;
            vs(i,it)=v(i,it);
            dy(i,it)=v(i,it)*tv/2;
            hs(i,it)=dy(i,it);
        end

        if i>1
            w1(i)=w(i)-0.5*k1;
            w2(i)=w1(i)+k1;
            wekv(i)=(w2(i)-w1(i))/log(w2(i)/w1(i));
            e(i,it)=u*Tt(i,it)/wekv(i);

            v(i,it)=qm*e(i,it)*tv;
            vs(i,it)=vs((i-1),it)+v(i,it);
            dy(i,it)=(vs((i-1),it)+vs(i,it))*tv/2;
            hs(i,it)=hs((i-1),it)+dy(i,it);
        end
    end
end

```

```

end

end

H(it)=1000*(vs(nv,it)*te+hs(nv,it));      % mm
% S=H/u                                  % mm/V
rez(it,1)=t(it);

rez(it,2)=H(it);
rez(it,3)=1000*hs(nv,it);
% rez
end % it ciklo pabaiga
% pause
disp(' t ,    H ,    hs ')
rez
diary off
plot(H)
disp(' Pereinamoji charakteristika - grafike...')
pause
disp(' pause')

% Statinio poslinkio ir jautrumo skaičiavimas
ls=znm*nv %sistemos ilgis, m
sn=wgm/wpm;
vsk=u*(ls*v0/(2*wpm*u0))*log(sn)/(sn-1);

H01=1000*vsk*lem/v0;
hs0=1000*u*(ls*ls/(2*wpm*u0))*(1-(1-(wpm/wgm))/log(wgm/wpm))/log(wgm/wpm);
diary on
H0=H01+hs0
S0=H0/u
diary off

% Normuotoji PCh
for it=1:61
Tn(it)=H(it)/H0;
rezt(it,1)=t(it);
rezt(it,2)=Tn(it);
end
diary on
disp(' t,    Tn')
rezt
diary off

plot(Tn)
disp(' Normuotoji pereinamoji charakteristika - grafike...')
pause
disp(' pause')

plot(1000*w)
disp(' Tarpas tarp kreipimo elektrodų - grafike...')
pause
disp(' pause')

plot(1000*y0)
disp(' Pradinė el. pluošto trajektorija - grafike...')
pause
disp(' pause')

for i=1:nv
rz3(i)=1000*v(i,it);
rz4(i)=1000*vs(i,it);

```

```
rz5(i)=1000*dy(i,it);
rz6(i)=1000*hs(i,it);
rz7(i)=1000*y(i,it);
end
plot(rz3)
disp( ' Elektrono įgytas po vija skersinis greitis - grafike...')
pause
disp( ' pause')

plot(rz4)
disp( ' Visas elektrono įgytas skersinis greitis - grafike...')
pause
disp( ' pause')

plot(rz5)
disp( ' Elektrono poslinkis po vija dėl greičio pokyčio - grafike...')
pause
disp( ' pause')

plot(rz6)
disp( ' Visas elektrono poslinkis po vija dėl el. lauko - grafike...')
pause
disp( ' pause')

plot(rz7)
disp( ' Visas elektrono poslinkis po vija - grafike...')
pause
disp( ' pause')
plot(y,e)
e
y
end
```

4 priedas

BBEV su simetrine sistema pereinamųjų charakteristikų skaičiavimo programa

```

script
clc
clear all

% KS - simetrine
% Ivertinami netiesiniai iskraipymai
% Skaičiuojama normuotoji PCh
% Patikslintas elektronų greičio ir statinio kreipimo skaičiavimas
% Modeliuojamas poslinkio įtampos poveikis pradinei elektronų trajektorijai

diary TWCRT_sim13_
diary on
date
clock

% Pradiniai duomenys
wg=1.5      % pusė tarpo tarp KE isejime, mm
zn=1.5      % KLE zingsnis, mm
wp=0.5      % pusė tarpo tarp KE įėjime, mm
nv=10       % zingsniu_skaicius
u0=1500     % greitinimo i_tampa, V
le=150      % ekrano nuotolis, mm
yp=-0.25    % pradine el. koordinatė (nuo ekrano), mm
yg=-0.75    % pradine el. koordinatė KS gale, mm
ygm=-0.75   % el. koordinatė KS gale, kai yra poslinkio įtampa, mm
vir=3.5     % viršutinis integravimo rezis, =vir*2*pi
nint=1000   % integravimo zingsniu_skaicius
u=35.       % kreipimo (vieno peties) i_tampa, V

% Pakeitus dimensijas
wpm=0.001*wp;
wgm=0.001*wg;
znm=0.001*zn;
lem=0.001*le;
ypm=0.001*yp;
ygm=0.001*yg;
ygmxm=0.001*ygm;

% Konstantos
c=2.998e8;
q=1.602e-19;
m=9.11e-31;
pi=4*atan(1);
qm=q/m;

% Apskaiciuoti dydziai
v0=sqrt(2*q*u0/m) % el. greitis
klet=c/v0;        % let. koeficientas
tv=znm/v0;        % lekio trukme, s
ts=tv*nv;         % lekio trukme sistemoje, s
te=lem/v0;        % lekio trukme iki ekrano, s
k1=(wgm-wpm)/nv;  % wgm=wpm+i*nv
k2=(ygm-ypm)/nv;  % ygm=ypm+i*nv
k3=(ygmxm-ygm)/nv/nv;
dint=vir*2*pi/nint; % integravimo zingsnis

rz3=zeros(nv,61);
rz4=zeros(nv,61);

```

```

rz5=zeros(nv,61);
rz6=zeros(nv,61);

% Pradines kint. reikšmes
wpvid=wpm+0.5*k1;
ypvid=ypm+0.5*k2+0.25*k3;

for it=1:61
    diary off
    it
    diary on
    t(it)=0.1*(it-16);

    y0(1)=ypvid;
% Prasideda ciklas, i - vijos numeris
    for i=1:nv
        w(i)=wpvid+(i-1)*k1;
        y0(i)=ypvid+(i-1)*k2+(i-1)*(i-1)*k3;

        Int(i,it)=0;
        Tt(i,it)=0;

        if i==1
            y(i,it)=y0(i);
        end
        if i>1
            y(i,it)=y0(i)+hs((i-1),it);
        end
        for j=1:nint
            tet(j)=j*dint;
            tet1(j)=0.5*tet(j);
            kf1(i,j)=(sin(tet1(j)))/(tet1(j));

            kf2(i,j,it)=(w(i)/znm)*tet(j)*cosh(abs(y(i,it))*tet(j)/znm)/sinh(w(i)*tet(j)/znm);

            kf(i,j,it)=kf1(i,j)*kf2(i,j,it);
            kfi(i,j,it)=kf(i,j)*(1/tet(j))*sin(tet(j)*t(it))*dint;
            Int(i,it)=Int(i,it)+kfi(i,j,it);
            Tt(i,it)=0.5+Int(i,it)/pi;
        end

        if i==1
            w1(i)=w(i)-0.5*k1;
            w2(i)=w1(i)+k1;
            wekv(i)=(w2(i)-w1(i))/log(w2(i)/w1(i));
            % Patikslintas greicio skaiciavimas
            e(i,it)=u*Tt(i,it)/wekv(i);
            v(i,it)=qm*e(i,it)*tv;
            vs(i,it)=v(i,it);
            dy(i,it)=v(i,it)*tv/2;
            hs(i,it)=dy(i,it);
        end

        if i>1
            w1(i)=w(i)-0.5*k1;
            w2(i)=w1(i)+k1;
            wekv(i)=(w2(i)-w1(i))/log(w2(i)/w1(i));
            e(i,it)=u*Tt(i,it)/wekv(i);
            v(i,it)=qm*e(i,it)*tv;
            vs(i,it)=vs((i-1),it)+v(i,it);
            dy(i,it)=(vs((i-1),it)+vs(i,it))*tv/2;
            hs(i,it)=hs((i-1),it)+dy(i,it);
        end
    end
end

```

```

end

H(it)=1000*(vs(nv,it)*te+hs(nv,it));      % mm
% S=H/u                                  % mm/V
rez(it,1)=t(it);
rez(it,2)=H(it);
rez(it,3)=1000*hs(nv,it);
% rez
end % it ciklo pabaiga
% pause
disp( ' t ,      H ,      hs ' )
rez
diary off
plot(H)
disp( ' Pereinamoji charakteristika - grafike...' )
pause
disp( ' pause' )

% Statinio poslinkio ir jautrumo skaičiavimas
ls=znm*nv      % sistemos ilgis, m
sn=wgmm/wpm;
vsk=u*(ls*v0/(2*wpm*u0))*log(sn)/(sn-1);

H01=1000*vsk*lem/v0;
hs0=1000*u*(ls*ls/(2*wpm*u0))*(1-(1-(wpm/wgmm))/log(wgmm/wpm))/log(wgmm/wpm);
diary on
H0=H01+hs0
S0=H0/u

diary off

% Normuotoji PCh
for it=1:61
Tn(it)=H(it)/H0;
rezt(it,1)=t(it);
rezt(it,2)=Tn(it);
end
diary on
disp( ' t,      Tn' )
rezt
diary off

plot(Tn)
disp( ' Normuotoji pereinamoji charakteristika - grafike...' )
pause
disp( ' pause' )

plot(1000*w)
disp( ' Tarpas tarp kreipimo elektrodų - grafike...' )
pause
disp( ' pause' )

plot(1000*y0)
disp( ' Pradinė el. pluošto trajektorija - grafike...' )
pause
disp( ' pause' )

for i=1:nv
rz3(i)=1000*v(i,it);
rz4(i)=1000*vs(i,it);
rz5(i)=1000*dy(i,it);
rz6(i)=1000*hs(i,it);
rz7(i)=1000*y(i,it);
end

```

```
plot(rz3)
disp( ' Elektrono įgytas po vija skersinis greitis - grafike...')
pause
disp( ' pause')

plot(rz4)
disp( ' Visas elektrono įgytas skersinis greitis - grafike...')
pause
disp( ' pause')

plot(rz5)
disp( ' Elektrono poslinkis po vija dėl greičio pokyčio - grafike...')
pause
disp( ' pause')

plot(rz6)
disp( ' Visas elektrono poslinkis po vija dėl el. lauko - grafike...')
pause
disp( ' pause')

plot(rz7)
disp( ' Visas elektrono poslinkis po vija - grafike...')
pause
disp( ' pause')

end
```

5 priedas

Kvazisimetrinės spiralinės sistemos savybių tyrimo programa

```

script
clc
clear all
% format long
diary CKS
diary on
echo on
date
% Paprastos kvazisimetrinės SS letinimo koeficiento, banginės varzos ir
% slopinimo skaičiavimo programa,
% Vijos varza skaičiuojama atsizvelgiant i isiskverbimo gyli

% pi=4*atan(1);
% j=sqrt(-1);
% Ypo=1/Zpo;
% Ypp=1/Zpp;
% Yoo=1/Zoo;
% Yop=1/Zop;

Zpo=40.3976;
Zpp=34.1995;
Zoo=56.4959;
Zop=38.1358;
Rf=0.38e-2; % Medžiaga - molibdenas. Varza, kai daznis 1 MHz
b=0.0075; % Vijos ilgio puse
L=0.0015; % Zingsnis
N=30; % Viju_ skaicius

diary off
echo off

pi=4*atan(1);
j=sqrt(-1);
Ypo=1/Zpo;
Ypp=1/Zpp;
Yoo=1/Zoo;
Yop=1/Zop;

T=0.1;
%
h=2*b;
kh=T;
khmin=0.75*kh;
khmax=1.5*kh;
kb=zeros(1,3);
kb(1)=khmin/2;
kb(2)=(khmin+khmax)/4;
kb(3)=khmax/2;
dt=zeros(3,1);
klet=zeros(30,1);
f=zeros(30,1);
R=zeros(30,1);
rez=zeros(30,3);

% Teta (T) keitimo ciklo pradzia
for m=1:30
    m
    % Sprendinio paieškos iteracijos pradzia
    for k=1:10000000

```

```

s=sin(T/2);
%R(i)=50;
R(m)=Rf*sqrt(kb(2)*3e2/(6.28*b));

Yp=Ypo+(Ypp-Ypo)*s*s;
Yo=Yoo+(Yop-Yoo)*s*s;

% Determinanto skaiciavimas 3 taskuose
% arti laukiamo sprendinio
for i=1:3
    A=zeros(4,4);
    A(1,1)=sin(kb(i))*(1+exp(-j*T));
    A(1,2)=cos(kb(i))*(1-exp(-j*T));
    A(1,3)=sin(kb(i))*(1+exp(-j*T));
    A(1,4)=cos(kb(i))*(1-exp(-j*T));

    A(2,1)=Yo*cos(kb(i))*(1-exp(-j*T));
    A(2,2)=-Yo*sin(kb(i))*(1+exp(-j*T));
    A(2,3)=Yp*cos(kb(i))*(1-exp(-j*T));
    A(2,4)=-Yp*sin(kb(i))*(1+exp(-j*T));

    A(3,1)=sin(kb(i))-j*Yo*R(m)*cos(kb(i));
    A(3,2)=cos(kb(i))+j*Yo*R(m)*sin(kb(i));
    A(3,3)=-sin(kb(i))+j*Yp*R(m)*cos(kb(i));
    A(3,4)=-cos(kb(i))-j*Yp*R(m)*sin(kb(i));

    A(4,1)=-sin(kb(i))+j*Yo*R(m)*cos(kb(i));
    A(4,2)=cos(kb(i))+j*Yo*R(m)*sin(kb(i));
    A(4,3)=sin(kb(i))-j*Yp*R(m)*cos(kb(i));
    A(4,4)=-cos(kb(i))-j*Yp*R(m)*sin(kb(i));

    dt(i)=imag(det(A));
end
% Determinanto skaiciavimo ciklo pabaiga
%

% Tikrinama, ar uzduotame intervale yra sprendinys
s1=dt(1)*dt(2);
s2=dt(2)*dt(3);
if s1*s2>0;
    echo on
    % Nerasta sprendinio

    echo off
end
% RADIUS sprendini_, siaurinamas kh intervalas
    if s1<0;
        kbmin=kb(1);
        kbmax=kb(2);
    end
    if s2<0;
        kbmin=kb(2);
        kbmax=kb(3);
    end
    kbvid=(kbmin+kbmax)/2;
    kb(1)=kbmin;
    kb(2)=kbvid;
    kb(3)=kbmax;
    delta=(kbmax-kbmin)/kbvid;
    if delta<0.000000000001;

```

```

        kbg=kbvid;
        % Jeigu nera sprendinio, neranda kbg
        break
        % Jei tenkinamas tikslumas, iseinama is ciklo
    end
end
% Priartejimo ciklo pabaiga
% Letinimo koeficiento ir daznio skaiciavimas
klet(m)=(T/kgb)*b/L;
f(m)=0.3*kgb/b/2/pi;

B12=1;
% Kitu_ koeficientu_ skaiciavimas
% 3 lygciu_ sistemos determinantas

    B(1,1)=sin(kbg)*(1+exp(-j*T));
    B(1,2)=cos(kbg)*(1-exp(-j*T));
    B(1,3)=sin(kbg)*(1+exp(-j*T));

    B(2,1)=Yo*cos(kbg)*(1-exp(-j*T));
    B(2,2)=-Yo*sin(kbg)*(1+exp(-j*T));
    B(2,3)=Yp*cos(kbg)*(1-exp(-j*T));

    B(3,1)=sin(kbg)-j*Yo*R(m)*cos(kbg);
    B(3,2)=cos(kbg)+j*Yo*R(m)*sin(kbg);
    B(3,3)=-sin(kbg)+j*Yp*R(m)*cos(kbg);

dt3=det(B);
% Koeficiento A11 skaiciavimas
    D(1,1)=-cos(kbg)*(1-exp(-j*T));
    D(1,2)=cos(kbg)*(1-exp(-j*T));
    D(1,3)=sin(kbg)*(1+exp(-j*T));

    D(2,1)=Yp*sin(kbg)*(1+exp(-j*T));
    D(2,2)=-Yo*sin(kbg)*(1+exp(-j*T));
    D(2,3)=Yp*cos(kbg)*(1-exp(-j*T));

    D(3,1)=cos(kbg)+j*Yp*R(m)*cos(kbg); %itarimas kad blogai turi buti
//cos(kbg)+j*Yp*R(m)*cos(kbg)//
    D(3,2)=cos(kbg)+j*Yo*R(m)*sin(kbg);
    D(3,3)=-sin(kbg)+j*Yp*R(m)*cos(kbg);

dta11=det(D);
A11=dta11/dt3;
% Koeficiento A12 skaiciavimas
    E(1,1)=sin(kbg)*(1+exp(-j*T));
    E(1,2)=-cos(kbg)*(1-exp(-j*T));
    E(1,3)=sin(kbg)*(1+exp(-j*T));

    E(2,1)=Yo*cos(kbg)*(1-exp(-j*T));
    E(2,2)=Yp*sin(kbg)*(1+exp(-j*T));
    E(2,3)=Yp*cos(kbg)*(1-exp(-j*T));

    E(3,1)=sin(kbg)-j*Yo*R(m)*cos(kbg);
    E(3,2)=cos(kbg)+j*Yp*R(m)*cos(kbg);%itarimas kad blogai turi buti
//cos(kbg)+j*Yp*R(m)*cos(kbg)//
    E(3,3)=-sin(kbg)+j*Yp*R(m)*cos(kbg);

dta12=det(E);
A12=dta12/dt3;

% Koeficiento B11 skaiciavimas

```

```

F(1,1)=sin(kbg)*(1+exp(-j*T));
F(1,2)=cos(kbg)*(1-exp(-j*T));
F(1,3)=-cos(kbg)*(1-exp(-j*T));

F(2,1)=Yo*cos(kbg)*(1-exp(-j*T));
F(2,2)=-Yo*sin(kbg)*(1+exp(-j*T));
F(2,3)=Yp*sin(kbg)*(1+exp(-j*T));

F(3,1)=sin(kbg)-j*Yo*R(m)*cos(kbg);
F(3,2)=cos(kbg)+j*Yo*R(m)*sin(kbg);
F(3,3)=cos(kbg)+j*Yp*R(m)*cos(kbg);%itarimas kad blogai turi buti
//cos(kbg)+j*Yp*R(m)*cos(kbg)//

dtb11=det(F);
B11=dtb11/dt3;

% I_ejimo varza

Zin(m)=abs((B12+A12)/(Yp*B11+Yo*A11));

% Slopinimas

I10=abs((Yo*A11-Yp*B11)*cos(kbg)+(Yp*B12-Yo*A12)*sin(kbg));
U20=abs(B12+A12);
alfa(m)=R(m)*Zin(m)*I10*I10/(U20*U20);
I10mb=abs((Yo*A11-Yp*B11)*cos(kbg)-(Yp*B12-Yo*A12)*sin(kbg));

alfa2(m)=R(m)*Zin(m)*(I10mb*I10mb+I10*I10)/(U20*U20)/2;

rez(m,1)=T;

rez(m,2)=f(m);
rez(m,3)=klet(m);
rez(m,4)=R(m);
rez(m,5)=Zin(m);
rez(m,6)=alfa(m);
%

T(m)=T+0.1;
T=T(m);
kbapyt=(T/klet(m))*b/L;
kb(1)=0.9*kbapyt;
kb(2)=kbapyt;
kb(3)=1.1*kbapyt;
end

diary on
% T, f, klet, R
rez
diary off
echo off

plot(klet)
pause

plot(R)
pause

plot(Zin)

```

pause

plot(alfa)

pause

plot(alfa2)

pause

end

6 priedas

Dvipradės spiralinės sistemos elektrinio lauko tyrimo programa

```

script
clc
clear all
pi=4*atan(1);
echo on
diary dvipakope_0a
diary on
% Potencialo pasiskirstymo skaiciavimo programa baigtiniu skirtumu metodu
% pause
date
clock
%
xt1=80;
xt2=96;
xt3=136;
xt4=152;
xmax=232;
yt1=16;
yt2=20;
ymax=60;
vij=0.2;
R=1.5;
it=2000;
diary off
% Formuojama pradine matrica
echo off
x1=xt1+2;
x2=xt2+2;
x3=xt3+2;
x4=xt4+2;
xm=xmax+2;
y1=yt1+1;
y2=yt2+1;
ym=ymax+1;
for I1=1:17
    Tet=(I1-1)*pi/8;
    tj=sqrt(-1)*Tet;
    for i=1:(xm+1)
        for j=1:ym
            v(i,j)=vij;
        end
    end
end
%
% Ekranu_ potencialai - 0
for i=2:xm
    v(i,1)=0;
    v(i,ym)=0;
end
% Pirmojo laid. potencialas - exp(tj)
for i=2:x1
    for j=y1:y2
        v(i,j)=1*exp(sqrt(-1)*Tet);
    end
end
% Antrojo laid. potencialas - 1
for i=x2:x3
    for j=y1:y2
        v(i,j)=1;
    end
end

```

```

end
% Treciojo laid. potencialas - exp(-tj)
for i=x4:xm
    for j=y1:y2
        v(i,j)=1*exp(-sqrt(-1)*Tet);
    end
end

v(x1,y1);
v(x2,y1);
%
% Potencialai kaireje ir desineje
%
for j=1:ym
    v(1,j)=exp(2*tj)*v(xm-1,j);
end
%
for j=1:ym
    v((xm+1),j)=exp(-2*tj)*v(3,j);
end
%
for i=1:(xm+1)
    for j=1:ym
        vs(i,j)=v(i,j);
    end
end
%
% Isvedama pradine matrica
mesh(real(vs))
pause
mesh(imag(vs))
pause
mesh(abs(vs))
pause
it
%
% echo on
% Priartejimo ciklas
tic
% echo off
for n=1:it
    Tet
    it
    n
for i=2:xm
    for j=2:(y1-1)
        v(i,j)=R*((v((i-1),j)+v((i+1),j)+v(i,(j-1))+v(i,(j+1))))/4)+(1-R)*vs(i,j);
        vs(i,j)=v(i,j);
    end
end
%
for i=(x1+1):(x2-1)
    for j=y1:y2
        v(i,j)=R*((v((i-1),j)+v((i+1),j)+v(i,(j-1))+v(i,(j+1))))/4)+(1-R)*vs(i,j);
        vs(i,j)=v(i,j);
    end
end
%
for i=(x3+1):(x4-1)
    for j=y1:y2
        v(i,j)=R*((v((i-1),j)+v((i+1),j)+v(i,(j-1))+v(i,(j+1))))/4)+(1-R)*vs(i,j);
        vs(i,j)=v(i,j);
    end
end
end

```

```

%
for i=2:xm
    for j=(y2+1):(ym-1)
        v(i,j)=R*((v((i-1),j)+v((i+1),j)+v(i,(j-1))+v(i,(j+1)))/4)+(1-R)*vs(i,j);
        vs(i,j)=v(i,j);
    end
end
%
% Potencialai kaireje ir desineje
%
for j=1:ym
    v(1,j)=exp(2*tj)*v(xm-1,j);
    vs(i,j)=v(i,j);
end
%
for j=1:ym
    v((xm+1),j)=exp(-2*tj)*v(3,j);
    vs(i,j)=v(i,j);
end
end
%
echo on
% Priartėjimo ciklo pabaiga
% Potencialo pasiskirstymo grafikai
pause
mesh(real(v))
pause
mesh(imag(v))
pause
mesh(abs(v))
diary on
toc
echo off
v;
diary off

% El. lauko stiprumo skaičiavimas
%
yv=floor((y2+ym)/2);
for k=2:xm
    e(k,1)=vs(k,y2+1)-vs(k,y2);
    et(k-1,1)=e(k,1);
    e(k,2)=vs(k,yv+1)-vs(k,yv);
    et(k-1,2)=e(k,2);
    e(k,3)=vs(k,ym)-vs(k,(ym-1));
    et(k-1,3)=e(k,3);
end
diary on
e;
diary off
echo on
mesh(abs(et));
pause
mesh(real(et));
pause
mesh(imag(et));
pause
echo off
%
idtet=sqrt(-1)*2*Tet/xmax;
for n=1:3
    for k=2:xm
        c(k,n)=-e(k,n)*exp(idtet*(k-2));
    end
end

```

```
end
%
% Ey skaiciavimas
%
for m=1:3
    sc(m)=0;
    c2(m)=0.5*c(2,m);
    cm(m)=0.5*c(xm,m);
    for k=3:(xm-1)
        sc(m)=sc(m)+c(k,m);
    end
    sc(m)=sc(m)+c2(m)+cm(m);
    ey(m)=sc(m)*(ymax-yt2)/xmax;
end
diary on
echo on
Tet
Tet/pi
ey0=abs(ey)
echo off
diary off
end
end
```

7 priedas

**Dvipradės spiralinės sistemos su pastovaus pločio spiralėmis
savybių tyrimo programa**

```
script
clear
clc
clear global
format long
%diary PSLS.txt
%diary on
echo on
date
clock
pi=4*atan(1);
%Pradiniai duomenys

h=0.02
L=0.0015;
%l=0.0005
%p=0.0004
%dielektriku storis ish abieju pusių po 0.005
%dielektrine skvarba 1

%diary off

echo off

T=0.01;

for m=1:120 % Teta (T) keitimo ciklo pradžia
m;
Z1p0=65.8685;
Z1pp=91,7201;
Y1p0=1/Z1p0;
Y1pp=1/Z1pp;

Y1B=Y1p0+(Y1pp-Y1p0)*sin(T/2)^2;
Y1Bp=Y1p0+(Y1pp-Y1p0)*sin((T+pi)/2)^2;

Z1B=1/Y1B;
Z1Bp=1/Y1Bp;
    %Letinimo koeficiento ir dažnio skaičiavimas
    klet(m)=h/2/L;
    k=T/h;
    f(m)=0.3*k/2/pi;

    %Iėjimo varžos skaičiavimas
    %Zb, kai x=0

    Zb0=j*2/(Y1B+Y1Bp);

    Zin=Zb0;
    ZinR(m)=real(Zin);
    ZinI(m)=imag(Zin);
    Z(m)=abs(Zin);
    Tet(m)=T;

    rez(m,1)=m;
    rez(m,2)=Tet(m);
```

```
rez(m,3)=f(m);
rez(m,4)=klet(m);
rez(m,5)=Z(m);

T=T+0.05;

skapyt=(T/klet(m))/L;

sk(1)=0.9*skapyt;
sk(2)=0.95*skapyt;
sk(3)=skapyt;
sk(4)=skapyt/0.95;
sk(5)=skapyt/0.9;

end
%Teta keitimo ciklo (m) pabaiga
%diary on
rez
diary off
echo on
plot(f,klet)
echo off
pause
echo on
plot(f,ZinR)
pause
plot(f,ZinI)
pause
plot(f,Z)
echo off
end
```

8 priedas**Dvipradės spiralinės sistemos su kintančio pločio spiralėmis
savybių tyrimo programa**

```
script
clear
clc
clear global
format long
diary NSLS.txt
%diary on
echo on
date
clock
pi=4*atan(1);
%Pradiniai duomenys

h=0.01 %2h pagal modeli)
a=h/2

L=0.0015;
%l=0.0005
%p=0.0004
%dielektriku storis ish abieju pusiu po 0.005
%dielektrine skvarba 1

%diary off
echo off

T=1.11;
%
kh=T;
skp=kh/h;

sk=zeros(5,1);
sk(1,1)=skp*0.000001;
sk(2,1)=skp*0.5;
sk(3,1)=skp;
sk(4,1)=skp/0.5;
sk(5,1)=skp/0.000001;

Z1p0=50,4632;
Z1pp=41,3026;
Z2p0=67,9059;
Z2pp=52,367;

Y1p0=1/Z1p0;
Y1pp=1/Z1pp;
Y2p0=1/Z2p0;
Y2pp=1/Z2pp;

dt=zeros(5,1);
Tet=zeros(120,1);
klet=zeros(120,1);
f=zeros(120,1);
Zin0=zeros(120,1);
Zin1=zeros(120,1);
rez=zeros(120,5);

for m=1:120 % Teta (T) keitimo ciklo pradzia
```

```

m;

Y1B=Y1p0+(Y1pp-Y1p0)*sin(T/2)^2;
Y1Bp=Y1p0+(Y1pp-Y1p0)*sin((T+pi)/2)^2;
Y2B=Y2p0+(Y2pp-Y2p0)*sin(T/2)^2;
Y2Bp=Y2p0+(Y2pp-Y2p0)*sin((T+pi)/2)^2;
Z1B=1/Y1B;
Z1Bp=1/Y1Bp;
Z2B=1/Y2B;
Z2Bp=1/Y2Bp;

%Sprendinio paieškos iteracijos pradžia
for kl=1:10000
    kl;
    A=zeros(4,4);
    %Determinanto skaičiavimas (5 taskai) arti laukiamo sprendinio
    for i=1:5
        SKA=sin(sk(i,1)*a);
        CKA=cos(sk(i,1)*a);
        ej=exp(j*T);
        TKA=SKA/CKA;

        %pirma lygtis;
        A(1,1)=SKA*(1-1/ej); %A11;
        A(1,2)=CKA*(1+1/ej); %A12;
        A(1,3)=SKA*(1+1/ej); %A13;
        A(1,4)=CKA*(1-1/ej); %A14;

        %antra (16) lygtis;
        A(2,1)=-SKA*(1-1/ej); %A11;
        A(2,2)=-CKA*(1+1/ej); %A12;
        A(2,3)=SKA*(1+1/ej); %A13;
        A(2,4)=CKA*(1-1/ej); %A14;

        %trečia lygtis;
        A(3,1)=CKA*(Y1B+Y2B/ej); %A11;
        A(3,2)=SKA*(Y2B/ej-Y1B); %A12;
        A(3,3)=CKA*(Y1Bp-Y2Bp/ej); %A13;
        A(3,4)=-SKA*(Y1Bp+Y2Bp/ej); %A14;

        %ketvirta (16) lygtis;
        A(4,1)=CKA*(Y1B+Y2B*ej); %A11;
        A(4,2)=SKA*(Y1B-Y2B*ej); %A12;
        A(4,3)=CKA*(Y1Bp-Y2Bp*ej); %A13;
        A(4,4)=SKA*(Y1Bp+Y2Bp*ej); %A14;

        dt(i,1)=real(det(A));

    end
    %Ar yra šiame intervale sprendinys
    s(1)=dt(1,1)*dt(2,1);
    s(2)=dt(2,1)*dt(3,1);
    s(3)=dt(3,1)*dt(4,1);

    s(4)=dt(4,1)*dt(5,1);

    %Jei intervale yra sprendinys, siauriname k intervala
    if s(1)<0;
        skmin=sk(1,1);
        skmax=sk(2,1);
    end
    if s(2)<0;
        skmin=sk(2,1);

```

```

        skmax=sk(3,1);
    end

        if s(3)<0;
            skmin=sk(3,1);
            skmax=sk(4,1);
        end
        if s(4)<0;
            skmin=sk(4,1);
            skmax=sk(5,1);
        end
    if s(1)>0
        if s(2)>0
            if s(3)>0
                if s(4)>0
                    echo on
                    %nerasta sprendinio
                    dt %determinantas
                    T
                    % pause(1)
                    echo off
                    break
                end
            end
        end
    end
end

%Intervalo paieškos pabaiga
skvid=(skmin+skmax)/2;
sk(1,1)=skmin;
sk(2,1)=(skmin+skvid)/2;
sk(3,1)=skvid;
sk(4,1)=(skvid+skmax)/2;
sk(5,1)=skmax;
%
delta=(skmax-skmin)/skvid;

if delta<0.0000000000001;
    skg=skvid;
    %Jei nera sprendinio, neranda kg
    break
end
    %Jei tenkinamas tikslumas, iseinama is ciklo (kl)

    echo off
end %Priartejimo ciklo (kl) pabaiga
%
%Letinimo koeficiento ir daznio skaiciavimas
klet(m)=T/(skg*L);
f(m)=0.3*skg/2/pi;
%Iejimo varzos skaciavimas
%Zb0 ir Zb1, kai x=0
S=(-Y1Bp+cos(T)*Y2Bp+TKA^2*cot(T/2)*sin(T)*Y2Bp)/(Y1B+cos(T)*Y2B-...
TKA^2*sin(T)*tan(T/2)*Y2B);
%S=(-Y2Bp*sin(T)+TKA^2*cot(T/2)*Y1Bp+TKA^2*cot(T/2)*cos(T)*Y2Bp)/(-...
Y2B*sin(T)+TKA^2*tan(T/2)*Y1B-TKA^2*cos(T)*tan(T/2)*Y2B);
Zb0=(tan(skg*a)*S*tan(T/2)+tan(skg*a)*cot(T/2))/(S*Y1B+Y1Bp)
Zb1=(tan(skg*a)*cot(T/2)-S*tan(skg*a)*tan(T/2))/(Y2Bp-Y2B*S)

Zin0=Zb0;
Zin1=Zb1;
ZinR0(m)=real(Zin0);
ZinI0(m)=imag(Zin0);

```

```
ZinR1(m)=real(Zin1);
ZinI1(m)=imag(Zin1);
Z0(m)=abs(Zin0);
Z1(m)=abs(Zin1);
Tet(m)=T;

rez(m,1)=Tet(m);
rez(m,2)=f(m);
rez(m,3)=klet(m);
rez(m,4)=Z0(m);
rez(m,5)=Z1(m);

T=T+0.05;

skapyt=(T/klet(m))/L;

sk(1)=0.9*skapyt;
sk(2)=0.95*skapyt;
sk(3)=skapyt;
sk(4)=skapyt/0.95;
sk(5)=skapyt/0.9;

end
%Teta keitimo ciklo (m) pabaiga
diary on
rez
diary off
echo on
plot(f,klet)
echo off
pause
echo on
plot(f,ZinR0)
pause
plot(f,ZinI0)
pause
plot(f,ZinR1)
pause
plot(f,ZinI1)
pause
plot(f,Z0)
pause
plot(f,Z1)
pause
echo off
end
```

Laikiklių įtakos įvertinimo meandrinės sistemos savybėms tyrimo programa

[illegible]

```

SKA=sin(sk(i,1)*a);
CKA=cos(sk(i,1)*a);
SKC=-sin(sk(i,1)*c);
CKC=cos(sk(i,1)*c);
SKB=sin(sk(i,1)*b);
CKB=cos(sk(i,1)*b);
ej=exp(j*T);
ejp=exp(j*(T+pi));
om(i,1)=0.3*sk(i,1);
%pirma lygtis;
A(1,1)=ejp; %A11;
A(1,2)=0; %A12;
A(1,3)=0; %A13;
A(1,4)=ej; %A14;
A(1,5)=-ejp; %A21;
A(1,6)=0; %A22;
A(1,7)=0; %A23;
A(1,8)=-ej; %A24;
%antra lygtis;
A(2,1)=0; %A11;
A(2,2)=0; %A12;
A(2,3)=0; %A13;
A(2,4)=0; %A14;
A(2,5)=CKA*(ejp-1); %A21;
A(2,6)=SKA*(ejp-1); %A22;
A(2,7)=SKA*(ej-1); %A23;
A(2,8)=CKA*(ej-1); %A24;
%trečia lygtis;
A(3,1)=-1; %A11;
A(3,2)=0; %A12;
A(3,3)=0; %A13;
A(3,4)=-1; %A14;
A(3,5)=1; %A21;
A(3,6)=0; %A22;
A(3,7)=0; %A23;
A(3,8)=1; %A24;
%ketvirta lygtis;
A(4,1)=CKC*(1-1/ejp); %A11;
A(4,2)=SKC*(1-1/ejp); %A12;
A(4,3)=SKC*(1-1/ej); %A13;
A(4,4)=CKC*(1-1/ej); %A14;
A(4,5)=0; %A21;
A(4,6)=0; %A22;
A(4,7)=0; %A23;
A(4,8)=0; %A24;
%penkta lygtis;
A(5,1)=-j*om(i,1)*C1*ejp; %A11;
A(5,2)= j/KBp*ejp; %A12;
A(5,3)=j/KB*ej; %A13;
A(5,4)=-j*om(i,1)*C1*ej; %A14;
A(5,5)=0; %A21;
A(5,6)=-j/KBp*ejp; %A22;
A(5,7)=-j/KB*ej; %A23;
A(5,8)=0; %A24;
%sesta lygtis;
A(6,1)=0; %A11;
A(6,2)=0; %A12;
A(6,3)=0; %A13;
A(6,4)=0; %A14;
A(6,5)=-j/KBp*SKA*ejp-j/KBp*SKA+j*om(i,1)*C2*CKA*ejp; %A21;
A(6,6)=j/KBp*CKA*ejp+j/KBp*CKA+j*om(i,1)*C2*SKA*ejp; %A22;
A(6,7)=j/KB*CKA*ej+j/KB*CKA+j*om(i,1)*C2*SKA*ej; %A23;
A(6,8)=-j/KB*SKA*ej-j/KB*SKA+j*om(i,1)*C2*CKA*ej; %A24;
%septinta lygtis;

```

```

A(7,1)=0; %A11;
A(7,2)=-j/KBp; %A12;
A(7,3)=-j/KB; %A13;
A(7,4)=0; %A14;
A(7,5)=-j*om(i,1)*C1; %A21;
A(7,6)=j/KBp; %A22;
A(7,7)=j/KB; %A23;
A(7,8)=-j*om(i,1)*C1; %A24;
%astunta lygtis;
A(8,1)=-j/KBp*SKC-j/KBp*SKC*1/ejp+j*om(i,1)*C2*CKC; %A11;
A(8,2)=j/KBp*CKC+j/KBp*CKC*1/ejp+j*om(i,1)*C2*SKC; %A12;
A(8,3)=j/KB*CKC+j/KB*CKC*1/ej+j*om(i,1)*C2*SKC; %A13;
A(8,4)=-j/KB*SKC-j/KB*SKC*1/ej+j*om(i,1)*C2*CKC; %A14;
A(8,5)=0; %A21;
A(8,6)=0; %A22;
A(8,7)=0; %A23;
A(8,8)=0; %A24;

dt(i,1)=real(det(A));
end
%Ar yra šiame intervale sprendinys
s(1)=dt(1,1)*dt(2,1);
s(2)=dt(2,1)*dt(3,1);
s(3)=dt(3,1)*dt(4,1);
s(4)=dt(4,1)*dt(5,1);

%Jei intervale yra sprendinys, siauriname k intervala
if s(1)<0;
    skmin=sk(1,1);
    skmax=sk(2,1);
end
if s(2)<0;
    skmin=sk(2,1);
    skmax=sk(3,1);
end
if s(3)<0;
    skmin=sk(3,1);
    skmax=sk(4,1);
end
if s(4)<0;
    skmin=sk(4,1);
    skmax=sk(5,1);
end
if s(1)>0
    if s(2)>0
        if s(3)>0
            if s(4)>0
                echo on
                %nerasta sprendinio
                dt %determinantas
                T
                % pause(1)
                echo off
                break
            end
        end
    end
end
end

%Intervalo paieškos pabaiga
skvid=(skmin+skmax)/2;
sk(1,1)=skmin;
sk(2,1)=(skmin+skvid)/2;
sk(3,1)=skvid;

```

```

sk(4,1)=(skvid+skmax)/2;
sk(5,1)=skmax;
%
delta=(skmax-skmin)/skvid;
if delta<0.0000000001;
    skg=skvid;
    %Jei nera sprendinio, neranda kg
    break
end
    %Jei tenkinamas tikslumas, iseinama is ciklo (kl)
    echo off
end %Priartėjimo ciklo (kl) pabaiga
%
%Letinimo koeficiento ir dažnio skaičiavimas
klet(m)=T/(skg*L);
f(m)=0.3*skg/2/pi;
%Įėjimo varžos skaičiavimas
om1=skg*0.3;
ej=exp(j*T);
W1=(1+1/ej)/(1-1/ej);
W2=om1*C1/YB;
W3=2*cot(skg*a);
W4=om1*C1/YBp;
W5=j*YB;
W6=j*YBp;
W7=1;
W8=1;
W9=2*tan(skg*a)*YBp/YB;
W10=(1-1/ej+om1*C2*1/ej/YBp)/(1+1/ej-om1*C2*1/ej/YBp);
W11=(W3*W1+W9*W10)/(W4*W1-W2*W10);
Zin=(W11*W7+W8)/(W5/2*(W11*W4*W1-W3*W1-W2)+W6/2*(W2/W1-W11*W3/W1-W11*W4))
ZinR(m)=real(Zin);
ZinI(m)=imag(Zin);
Z(m)=abs(Zin);
Tet(m)=T;

rez(m,1)=m;
rez(m,2)=Tet(m);
rez(m,3)=f(m);
rez(m,4)=klet(m);
rez(m,5)=Z(m);

T=T+0.05;

skapyt=(T/klet(m))/L;
sk(1)=0.9*skapyt;
sk(2)=0.95*skapyt;
sk(3)=skapyt;
sk(4)=skapyt/0.95;
sk(5)=skapyt/0.9;

end %Teta keitimo ciklo (m) pabaiga
%diary on
rez
diary off
plot(f,klet)
pause
plot(f,Z)
echo off
end

```

10 priedas

Laikiklių įtakos įvertinimo spiralinės sistemos savybėms tyrimo programa

```

script
clear
clc
clear global
format long
diary 6pav_a_dal_c_lyg_3.txt
diary on
echo on
date
clock
%Pradiniai duomenys
a=0.012;
b=0.016;
h=b;
c=b-a;
L=0.002;
%l=0.0005
%p=0.0004
%dielektriku storis ish abieju pusu po 0.005
%dielektrine skvarba 1
%
C1=0.0001; %nanofaradais
C2=0.0001; %nanofaradais
%diary off
%
pause(1)
echo off
pi=4*atan(1);
%
T=0.01;
%
kh=T;
skp=kh/h;
sk=zeros(5,1);
sk(1,1)=0.1*skp;
sk(2,1)=0.9*skp;
sk(3,1)=skp;
sk(4,1)=1.1*skp;
sk(5,1)=1.9*skp;
Zp0=48.865;
Zpp=31.037;
Yp0=1/Zp0;
Ypp=1/Zpp;
om=zeros(5,1);
dt=zeros(5,1);
Tet=zeros(120,1);
klet=zeros(120,1);
f=zeros(120,1);
rez=zeros(120,5);
for m=1:120 % Teta (T) keitimo ciklo pradzia
    m
    YB=Yp0+(Ypp-Yp0)*sin(T/2)^2;
    %Sprendinio paieskos iteracijos pradzia
    for kl=1:10000
        kl
        A=zeros(2,2);
        %Determinanto skaiciavimas (5 taskai) arti laukiamo sprendinio
        for i=1:5
            SKA=sin(sk(i,1)*a);

```

```

    CKA=cos(sk(i,1)*a);
    SKC=sin(sk(i,1)*c);
    CKC=cos(sk(i,1)*c);
    SKB=sin(sk(i,1)*b);
    CKB=cos(sk(i,1)*b);
    ej=exp(j*T);
    %dk(i,1)=0.3*sk(i,1);
    om(i,1)=0.3*sk(i,1);
    A(1,1)=SKC*ej+SKA;
    A(1,2)=CKA-om(i,1)*C1*SKA/YB-CKC*ej;
    A(2,1)=CKC-om(i,1)*C2*SKC/YB-CKA/ej;
    A(2,2)=SKC+om(i,1)*C2*CKC/YB+om(i,1)*C1*CKA/(YB*ej)+SKA/ej;
    dt(i,1)=real(det(A));
end
%Ar yra šiame intervale sprendinys
s(1)=dt(1,1)*dt(2,1);
s(2)=dt(2,1)*dt(3,1);
s(3)=dt(3,1)*dt(4,1);
s(4)=dt(4,1)*dt(5,1);
%Jei intervale yra sprendinys, siauriname k intervala
if s(1)<0;
    skmin=sk(1,1);
    skmax=sk(2,1);
end
if s(2)<0;
    skmin=sk(2,1);
    skmax=sk(3,1);
end
    if s(3)<0;
        skmin=sk(3,1);
        skmax=sk(4,1);
    end
    if s(4)<0;
        skmin=sk(4,1);
        skmax=sk(5,1);
    end
if s(1)>0
    if s(2)>0
        if s(3)>0
            if s(4)>0
                echo on
                %nerasta sprendinio
                dt %determinantas
                kh
                %pause(1)
                echo off
                break
            end
        end
    end
end
end
end

%Intervalo paieškos pabaiga
skvid=(skmin+skmax)/2;
sk(1,1)=skmin;
sk(2,1)=(skmin+skvid)/2;
sk(3,1)=skvid;
sk(4,1)=(skvid+skmax)/2;
sk(5,1)=skmax;
%
delta=(skmax-skmin)/skvid;
if delta<0.0000000001;
    skg=skvid;
    %Jei nera sprendinio, neranda kg

```

```

        break
    end
    %Jei tenkinamas tikslumas, iseinama is ciklo (kl)

    echo off
end %Priartejimo ciklo (kl) pabaiga
%
%Letinimo koeficiento ir daznio skaiciavimas
klet(m)=T/(skg*L);
f(m)=0.3*skg/2/pi;

ZBTX=(sin(skg*c))*ej+sin(skg*a);
ZBTY=cos(skg*a)-(0.3*skg*C1*sin(skg*a))/YB-(cos(skg*c))*ej;

Zin1=ZBTX/ZBTY/(j*YB);
Zin=abs(Zin1)
Zin(m)=Zin;
Tet(m)=T;

rez(m,1)=m;
rez(m,2)=Tet(m);
rez(m,3)=f(m);
rez(m,4)=klet(m);
rez(m,5)=Zin(m);

T=T+0.05;
skapyt=(T/klet(m))/L;

sk(1)=0.8*skapyt;
sk(2)=0.95*skapyt;
sk(3)=skapyt;
sk(4)=skapyt/0.95;
sk(5)=skapyt/0.8;
end %Teta keitimo ciklo (m) pabaiga
%diary on
rez
diary off
echo on
plot(f,klet)

pause
    plot(f,Zin)
echo off
end

```

11 priedas**Nevienalyčių lovelinių meandrinių sistemų savybių tyrimo programa**

```
script
clear
clc
clear global
format long
diary NMLS.txt
diary on
echo on
date
clock
pi=4*atan(1);
%Pradiniai duomenys
a=0;
h=0.006;
h;
b=h-a;
L=0.0015;
%l=0.0005
%p=0.0004
%dielektriku storis ish abieju pusiu po 0.005
%dielektrine skvarba 1

diary off
echo off

T=0.01
kh=T;
skp=kh/h;
r=h;
sk=zeros(5,1);
sk(1,1)=skp*0.000001;
sk(2,1)=skp*0.5;
sk(3,1)=skp;
sk(4,1)=skp/0.5;
sk(5,1)=skp/0.000001;
Z1p0=77,3631;
Z1pp=57,2193;
Z2p0=77,3631;
Z2pp=57,2193;
Z3p0=77,3631;
Z3pp=57,2193;
Y1p0=1/Z1p0;
Y1pp=1/Z1pp;
Y2p0=1/Z2p0;
Y2pp=1/Z2pp;
Y3p0=1/Z3p0;
Y3pp=1/Z3pp;

dt=zeros(5,1);
Tet=zeros(120,1);
klet=zeros(120,1);
f=zeros(120,1);
ZinR=zeros(120,1);
ZinI=zeros(120,1);
rez=zeros(120,5);

for m=1:120 % Teta (T) keitimo ciklo pradzia
    m;
```

```

Y1B=Y1p0+(Y1pp-Y1p0)*sin(T/2)^2;
Y1Bp=Y1p0+(Y1pp-Y1p0)*sin((T+pi)/2)^2;
Y2B=Y2p0+(Y2pp-Y2p0)*sin(T/2)^2;
Y2Bp=Y2p0+(Y2pp-Y2p0)*sin((T+pi)/2)^2;
Y3B=Y3p0+(Y3pp-Y3p0)*sin(T/2)^2;
Y3Bp=Y3p0+(Y3pp-Y3p0)*sin((T+pi)/2)^2;
Z1B=1/Y1B;
Z1Bp=1/Y1Bp;
Z2B=1/Y2B;
Z2Bp=1/Y2Bp;
Z3B=1/Y3B;
Z3Bp=1/Y3Bp;
    %Sprendinio paieškos iteracijos pradžia
    for kl=1:10000
        kl;
        A=zeros(1,1);
        %Determinanto skaičiavimas (5 taskai) arti laukiamo sprendinio
        for i=1:5
            SKA=sin(sk(i,1)*a);
            CKA=cos(sk(i,1)*a);
            SKH=sin(sk(i,1)*b);
            CKH=cos(sk(i,1)*b);

            %pirma lygtis;
            A(1,1)=(Z2B/Z2Bp)*(Z1B*CKH*CKA-Z2B*SKH*SKA)/(Z1Bp*CKH*SKA+Z2Bp*SKH*CKA)...
            *(Z2Bp*CKH*CKA-Z1Bp*SKH*SKA)/(Z2B*CKH*SKA+Z1B*SKH*CKA)-(cot(T/2))^2; %A11;

            dt(i,1)=real(det(A));
        end
        %Ar yra šiame intervale sprendinys
        s(1)=dt(1,1)*dt(2,1);
        s(2)=dt(2,1)*dt(3,1);
        s(3)=dt(3,1)*dt(4,1);
        s(4)=dt(4,1)*dt(5,1);

        %Jei intervale yra sprendinys, siauriname k intervala
        if s(1)<0;
            skmin=sk(1,1);
            skmax=sk(2,1);
        end
        if s(2)<0;
            skmin=sk(2,1);
            skmax=sk(3,1);
        end
        if s(3)<0;
            skmin=sk(3,1);
            skmax=sk(4,1);
        end
        if s(4)<0;
            skmin=sk(4,1);
            skmax=sk(5,1);
        end
        if s(1)>0
            if s(2)>0
                if s(3)>0
                    if s(4)>0
                        echo on
                        %nerasta sprendinio
                        dt %determinantas
                        T
                        % pause(1)
                        echo off
                        break
                    end
                end
            end
        end
    end

```

```

        end
    end
end
%Intervalo paieškos pabaiga
skvid=(skmin+skmax)/2;
sk(1,1)=skmin;
sk(2,1)=(skmin+skvid)/2;
sk(3,1)=skvid;
sk(4,1)=(skvid+skmax)/2;
sk(5,1)=skmax;
%
delta=(skmax-skmin)/skvid;
if delta<0.000000000001;
    skg=skvid;
    %Jei nera sprendinio, neranda kg
    break
end
    %Jei tenkinamas tikslumas, iseinama is ciklo (kl)
    echo off
end %Priartėjimo ciklo (kl) pabaiga
%
%Letinimo koeficiento ir dažnio skaičiavimas
klet(m)=T/(skg*L);
f(m)=0.3*skg/2/pi;
%Įėjimo varžos skaičiavimas
%Kadangi Z2B=Z3B, o Z2Bp=Z3Bp. Zb, kai x=0
Zb0=Z1B*sqrt((Z2B/Z2Bp)*((Z1Bp*cos(skg*b)*sin(skg*a)+Z2Bp*sin(skg*b)*...
cos(skg*a))/(Z1B*sin(skg*b)*cos(skg*a)+Z2B*cos(skg*b)*sin(skg*a))))* ...
sqrt((Z1Bp*sin(skg*b)*sin(skg*a)-Z2Bp*cos(skg*b)*cos(skg*a))/...
(Z2B*sin(skg*b)*sin(skg*a)-Z1B*cos(skg*b)*cos(skg*a)));

Zin=Zb0
ZinR(m)=real(Zin);
ZinI(m)=imag(Zin);
Z(m)=abs(Zin);
Tet(m)=T;

%klZD=2/L*sqrt((a*Z1pp+b*Z2pp)*(a/Z1p0+b/Z2p0))

rez(m,1)=m;
rez(m,2)=Tet(m);
rez(m,3)=f(m);
rez(m,4)=klet(m);
rez(m,5)=Z(m);
T=T+0.05;
skapyt=(T/klet(m))/L;
sk(1)=0.9*skapyt;
sk(2)=0.95*skapyt;
sk(3)=skapyt;
sk(4)=skapyt/0.95;
sk(5)=skapyt/0.9;
end
%Teta keitimo ciklo (m) pabaiga
diary on
rez
diary off
plot(f,klet)
pause
plot(f,Z)
end

```

12 priedas

Vienalyčių lovelinių meandrinių sistemų savybių tyrimo programa

```
script
clear
clc
clear global
format long
diary NMLS.txt
diary on
echo on
date
clock
pi=4*atan(1);
%Pradiniai duomenys
a=0;
h=0.006;
h;
b=h-a;
L=0.0015;
%l=0.0005
%p=0.0004
%dielektriku storis ish abieju pusiu po 0.005
%dielektrine skvarba 1

diary off
echo off

T=0.01
kh=T;
skp=kh/h;
r=h;
sk=zeros(5,1);
sk(1,1)=skp*0.000001;
sk(2,1)=skp*0.5;
sk(3,1)=skp;
sk(4,1)=skp/0.5;
sk(5,1)=skp/0.000001;
Z1p0=77,3631;
Z1pp=57,2193;
Z2p0=77,3631;
Z2pp=57,2193;
Z3p0=77,3631;
Z3pp=57,2193;
Y1p0=1/Z1p0;
Y1pp=1/Z1pp;
Y2p0=1/Z2p0;
Y2pp=1/Z2pp;
Y3p0=1/Z3p0;
Y3pp=1/Z3pp;

dt=zeros(5,1);
Tet=zeros(120,1);
klet=zeros(120,1);
f=zeros(120,1);
ZinR=zeros(120,1);
ZinI=zeros(120,1);
rez=zeros(120,5);
skg=zeros(120,1);

for m=1:120 % Teta (T) keitimo ciklo pradzia
    m;
```

```

Y1B=Y1p0+(Y1pp-Y1p0)*sin(T/2)^2;
Y1Bp=Y1p0+(Y1pp-Y1p0)*sin((T+pi)/2)^2;
Y2B=Y2p0+(Y2pp-Y2p0)*sin(T/2)^2;
Y2Bp=Y2p0+(Y2pp-Y2p0)*sin((T+pi)/2)^2;
Y3B=Y3p0+(Y3pp-Y3p0)*sin(T/2)^2;
Y3Bp=Y3p0+(Y3pp-Y3p0)*sin((T+pi)/2)^2;
Z1B=1/Y1B;
Z1Bp=1/Y1Bp;
Z2B=1/Y2B;
Z2Bp=1/Y2Bp;
Z3B=1/Y3B;
Z3Bp=1/Y3Bp;

%Sprendinio paieškos iteracijos pradžia
for kl=1:10000
    kl;
    A=zeros(1,1);
    %Determinanto skaičiavimas (5 taskai) arti laukiamo sprendinio
    for i=1:5
        SKH=sin(sk(i,1)*h);
        CKH=cos(sk(i,1)*h);

        %pirma lygtis;
        A(1,1)=sqrt(Z1Bp/Z1B)*tan(T/2)+(SKH/CKH);

        dt(i,1)=real(det(A));
    end
    %Ar yra šiame intervale sprendinys
    s(1)=dt(1,1)*dt(2,1);
    s(2)=dt(2,1)*dt(3,1);
    s(3)=dt(3,1)*dt(4,1);
    s(4)=dt(4,1)*dt(5,1);

    %Jei intervale yra sprendinys, siauriname k intervalą
    if s(1)<0;
        skmin=sk(1,1);
        skmax=sk(2,1);
    end
    if s(2)<0;
        skmin=sk(2,1);
        skmax=sk(3,1);
    end
    if s(3)<0;
        skmin=sk(3,1);
        skmax=sk(4,1);
    end
    if s(4)<0;
        skmin=sk(4,1);
        skmax=sk(5,1);
    end
    if s(1)>0
        if s(2)>0
            if s(3)>0
                if s(4)>0
                    echo on
                    %nerasta sprendinio
                    dt %determinantas
                    T
                    % pause(1)
                    echo off
                    break
                end
            end
        end
    end
end
end

```

```

        end
    end

    %Intervalo paieškos pabaiga
    skvid=(skmin+skmax)/2;
    sk(1,1)=skmin;
    sk(2,1)=(skmin+skvid)/2;
    sk(3,1)=skvid;
    sk(4,1)=(skvid+skmax)/2;
    sk(5,1)=skmax;
    %
    delta=(skmax-skmin)/skvid;
    if delta<0.000000000001;
        skg=skvid;
        %Jei nera sprendinio, neranda kg
        break
    end
    %Jei tenkinamas tikslumas, iseinama is ciklo (kl)
    echo off
end %Priartejimo ciklo (kl) pabaiga
%
%Letinimo koeficiento ir daznio skaiciavimas
klet(m)=T/(skg*L);
f(m)=0.3*skg/2/pi;
%Iejimo varzos skaciavimas
%Kadangi Z2B=Z3B, o Z2Bp=Z3Bp. Zb, kai x=0
Zb0=sqrt(Z1B*Z1Bp)
Zin=Zb0
ZinR(m)=real(Zin);
ZinI(m)=imag(Zin);
Z(m)=abs(Zin);
Tet(m)=T;
%klZD=2/L*sqrt((a*Z1pp+b*Z2pp)*(a/Z1p0+b/Z2p0))
rez(m,1)=m;
rez(m,2)=Tet(m);
rez(m,3)=f(m);
rez(m,4)=klet(m);
rez(m,5)=Z(m);
T=T+0.05;
skapyt=(T/klet(m))/L;
sk(1)=0.9*skapyt;
sk(2)=0.95*skapyt;
sk(3)=skapyt;
sk(4)=skapyt/0.95;
sk(5)=skapyt/0.9;
end
%Teta keitimo ciklo (m) pabaiga
diary on
rez
diary off
plot(f,klet)
pause
echo on
plot(f,skg)
pause
plot(f,ZinI)
pause
plot(f,Z)
echo off
end

```

13 priedas

Vienalyčių lovelinių spiralinių sistemų savybių tyrimo programa

```
script
clear
clc
clear global
format long
diary PSS.txt
diary on
echo on
date
clock
pi=4*atan(1);
%Pradiniai duomenys

h=0.012
L=0.0015
%l=0.0005
%p=0.0004
%dielektriku storis ish abieju pusu po 0.005
%dielektrine skvarba 1

%diary off

echo off

T=0.01;

Z1p0=77,3631;
Z1pp=57,2193;
Y1p0=1/Z1p0;
Y1pp=1/Z1pp;

Tet=zeros(120,1);
klet=zeros(120,1);
f=zeros(120,1);
ZinR=zeros(120,1);
ZinI=zeros(120,1);
rez=zeros(120,5);

for m=1:120 % Teta (T) keitimo ciklo pradzia
    m;
    Y1B=Y1p0+(Y1pp-Y1p0)*sin(T/2)^2;
    Z1B=1/Y1B;

    %Letinimo koeficiento ir daznio skaiciavimas
    klet(m)=(h/L);
    k=T/h;
    f(m)=0.3*k/2/pi;

    %Iejimo varzos skaciavimas
    %Zb,
    Zb0=Z1B;

    Zin=Zb0;
    ZinR(m)=real(Zin);
    ZinI(m)=imag(Zin);
    Z(m)=abs(Zin);
    Tet(m)=T;
    rez(m,1)=m;
```

```
rez(m,2)=Tet(m);
rez(m,3)=f(m);
rez(m,4)=klet(m);
rez(m,5)=Z(m) ;

    T=T+0.05;

end
%Teta keitimo ciklo (m) pabaiga

rez
diary off
echo on
plot(f,klet)
echo off
    pause
echo on
plot(f,ZinR)
    pause
plot(f,ZinI)
    pause
plot(f,Z)
echo off
end
```

14 priedas

Lovelinių sistemų elektrinio lauko tyrimo programa

```
function pdemodel
[pde_fig,ax]=pdeinit;
pdetool('appl_cb',5);
set(ax,'DataAspectRatio',[1 2.25 1]);
set(ax,'PlotBoxAspectRatio',[1 0.66666666666666663 2]);
set(ax,'XLim',[0 1]);
set(ax,'YLim',[0 1.5]);
set(ax,'XTickMode','auto');
set(ax,'YTickMode','auto');

% Geometry description:
pdirect([0 1 1.2 0.59999999999999998], 'R2');
pdirect([0.69999999999999996 1 0.59999999999999998 0.29999999999999999], 'R3');
pdirect([0 1 0.29999999999999999 0], 'R4');
set(findobj(get(pde_fig, 'Children'), 'Tag', 'PDEEval'), 'String', 'R2+R3+R4')

% Boundary conditions:
pdetool('changemode',0)
pdesetbd(12,...
'neu',...
1,...
'0',...
'0')
pdesetbd(11,...
'neu',...
1,...
'0',...
'0')
pdesetbd(10,...
'neu',...
1,...
'0',...
'0')
pdesetbd(9,...
'neu',...
1,...
'0',...
'0')
pdesetbd(8,...
'neu',...
1,...
'0',...
'0')
pdesetbd(6,...
'dir',...
1,...
'1',...
'1')
pdesetbd(4,...
'dir',...
1,...
'1',...
'1')
pdesetbd(3,...
'dir',...
1,...
'1',...
'0')
pdesetbd(2,...
```

```

'dir',...
1,...
'1',...
'1')
pdesetbd(1,...
'dir',...
1,...
'1',...
'0')

% Mesh generation:
setupprop(pde_fig, 'Hgrad', 1.3);
setupprop(pde_fig, 'refinemethod', 'regular');
pdetool('initmesh')
pdetool('refine')
pdetool('refine')
pdetool('refine')
pdetool('refine')

% PDE coefficients:
pdeseteq(1,...
'0.00000000000008854!0.0000000000008854!0.0000000000008854',...
'0.0!0.0!0.0',...
'0!0!0',...
'1.0!1.0!1.0',...
'0:10',...
'0.0',...
'0.0',...
'[0 100]')
setupprop(pde_fig, 'currparam',...
['0.00000000000008854!0.0000000000008854!0.0000000000008854';...
'0!0!0'])

% Solve parameters:
setupprop(pde_fig, 'solveparam',...
str2mat('0', '91392', '10', 'pdeadworst',...
'0.5', 'longest', '0', '1E-4', '', 'fixed', 'Inf'))

% Plotflags and user data strings:
setupprop(pde_fig, 'plotflags', [1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 0 0 1]);
setupprop(pde_fig, 'colstring', '');
setupprop(pde_fig, 'arrowstring', '');
setupprop(pde_fig, 'deformstring', '');
setupprop(pde_fig, 'heightstring', '');

% Solve PDE:
pdetool('solve')

%function [p,e,t,u] = getpetu
%GETPETU Get p,e,t,u

pde_fig=findobj(allchild(0), 'flat', 'Tag', 'PDETool');

if isempty(pde_fig)
    error('PDE Toolbox GUI not active.')
end

u = get(findobj(pde_fig, 'Tag', 'PDEPlotMenu'), 'UserData');
l = get(findobj(pde_fig, 'Tag', 'winmenu'), 'UserData');
h=findobj(get(pde_fig, 'Children'), 'flat', 'Tag', 'PDEMeshMenu');
hp=findobj(get(h, 'Children'), 'flat', 'Tag', 'PDEInitMesh');
he=findobj(get(h, 'Children'), 'flat', 'Tag', 'PDERefine');
ht=findobj(get(h, 'Children'), 'flat', 'Tag', 'PDEMeshParam');
p=get(hp, 'UserData');
```

```

e=get(he, 'UserData');
t=get(ht, 'UserData');

params=get(findobj(get(pde_fig, 'Children'), 'flat', 'Tag', 'PDEPDEMenu'), ...
    'UserData');
ns=getuprop(pde_fig, 'ncafd');
nc=ns(1); na=ns(2); nf=ns(3); nd=ns(4);
idxstart = 1;
idxstop = nc;
c=params(idxstart:idxstop, :);
idxstart = idxstart+nc;
idxstop = idxstop + na;
a=params(idxstart:idxstop, :);
idxstart = idxstart+nc;
idxstop = idxstop + nf;
f=params(idxstart:idxstop, :);
idxstart = idxstart+nf;
idxstop = idxstop + nd;
d=params(idxstart:idxstop, :);

hbound = findobj(get(pde_fig, 'Children'), 'flat', 'Tag', 'PDEBoundMenu');
g = get(hbound, 'userdata');
hb_cld = get(hbound, 'children');
b = get(hb_cld(7), 'userdata');

%skaiciuojame trikampiu plotus
[ar0]=pdetrng(p,t);
%randame Ex ir Ey gradientu dedamasias kiekvienam trikampiui
[ux0,uy0] = pdegrad(p,t,u);
%randame Ex ir Ey kvadratu suma (E modulio kvadratas)
[gr0]=(ux0.^2 + uy0.^2);
%randame kiekviename trikampyje sukaupta energija
[E0]=8.854*1E-12*ar0.*gr0;
%susumuojame visa sukaupta energija ir gauname talpa ir verciam i metrus
C0=2*sum(E0);
ZB0=1/(3e+8)/C0;
%*****

[pde_fig,ax]=pdeinit;
pdetool('appl_cb',5);
set(ax,'DataAspectRatio',[1 2.25 1]);
set(ax,'PlotBoxAspectRatio',[1 0.6666666666666666 1]);
set(ax,'XLim',[0 1]);
set(ax,'YLim',[0 1.5]);
set(ax,'XTickMode','auto');
set(ax,'YTickMode','auto');

% Geometry description:
pdirect([0 1 1.2 0.5999999999999998], 'R2');
pdirect([0.6999999999999996 1 0.5999999999999998 0.2999999999999999], 'R3');
pdirect([0 1 0.2999999999999999 0], 'R4');
set(findobj(get(pde_fig, 'Children'), 'Tag', 'PDEEval'), 'String', 'R2+R3+R4')

% Boundary conditions:
pdetool('changemode',0)
pdesetbd(12,...
    'neu',...
    1,...
    '0',...
    '0')
pdesetbd(11,...
    'neu',...
    1,...
    '0',...

```

```

'0')
pdesetbd(10,...
'neu',...
1,...
'0',...
'0')
pdesetbd(9,...
'neu',...
1,...
'0',...
'0')
pdesetbd(8,...
'neu',...
1,...
'0',...
'0')
pdesetbd(6,...
'dir',...
1,...
'1',...
'1')
pdesetbd(4,...
'dir',...
1,...
'1',...
'1')
pdesetbd(3,...
'dir',...
1,...
'1',...
'0')
pdesetbd(2,...
'dir',...
1,...
'1',...
'1')
pdesetbd(1,...
'dir',...
1,...
'1',...
'0')

% Mesh generation:
setupprop(pde_fig, 'Hgrad', 1.3);
setupprop(pde_fig, 'refinemethod', 'regular');
pdetool('initmesh')
pdetool('refine')
pdetool('refine')
pdetool('refine')
pdetool('refine')

% PDE coefficients:
pdeseteq(1,...
'0.00000000008854!0.00000000004427!0.00000000004427',...
'0.0!0.0!0.0',...
'0!0!0',...
'1.0!1.0!1.0',...
'0:10',...
'0.0',...
'0.0',...
'[0 100]')
setupprop(pde_fig, 'currparam',...
['0.00000000008854!0.00000000004427!0.00000000004427';...
'0!0!0'])

```

```

% Solve parameters:
setupprop(pde_fig, 'solveparam', ...
str2mat('0', '91392', '10', 'pdeadworst', ...
'0.5', 'longest', '0', '1E-4', '', 'fixed', 'Inf'))

% Plotflags and user data strings:
setupprop(pde_fig, 'plotflags', [1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 0 0 1]);
setupprop(pde_fig, 'colstring', '');
setupprop(pde_fig, 'arrowstring', '');
setupprop(pde_fig, 'deformstring', '');
setupprop(pde_fig, 'heightstring', '');

% Solve PDE:
pdetool('solve')

%function [p,e,t,u] = getpetu
%GETPETU Get p,e,t,u

pde_fig=findobj(allchild(0), 'flat', 'Tag', 'PDETool');

if isempty(pde_fig)
    error('PDE Toolbox GUI not active.')
end

u = get(findobj(pde_fig, 'Tag', 'PDEPlotMenu'), 'UserData');
l =get(findobj(pde_fig, 'Tag', 'winmenu'), 'UserData');
h=findobj(get(pde_fig, 'Children'), 'flat', 'Tag', 'PDEMeshMenu');
hp=findobj(get(h, 'Children'), 'flat', 'Tag', 'PDEInitMesh');
he=findobj(get(h, 'Children'), 'flat', 'Tag', 'PDERefine');
ht=findobj(get(h, 'Children'), 'flat', 'Tag', 'PDEMeshParam');
p=get(hp, 'UserData');
e=get(he, 'UserData');
t=get(ht, 'UserData');

params=get(findobj(get(pde_fig, 'Children'), 'flat', 'Tag', 'PDEPDEMenu'), ...
'UserData');
ns=getupprop(pde_fig, 'ncafd');
nc=ns(1); na=ns(2); nf=ns(3); nd=ns(4);
idxstart = 1;
idxstop = nc;
c=params(idxstart:idxstop, :);
idxstart = idxstart+nc;
idxstop = idxstop + na;
a=params(idxstart:idxstop, :);
idxstart = idxstart+nc;
idxstop = idxstop + nf;
f=params(idxstart:idxstop, :);
idxstart = idxstart+nf;
idxstop = idxstop + nd;
d=params(idxstart:idxstop, :);

hbound = findobj(get(pde_fig, 'Children'), 'flat', 'Tag', 'PDEBoundMenu');
g = get(hbound, 'userdata');
hb_cld = get(hbound, 'children');
b = get(hb_cld(7), 'userdata');

%*****

sk=30;
eps1=10;
eps2=5;
eps3=5;

```

```

%pdemesh(p,e,t)
%pdesurf(p,t,u)
x1=linspace(0,1,30);
y1=linspace(0.6,1.2,30);
uxy1=tri2grid(p,t,u,x1,y1);
%surf(x1,y1,uxy1)
x1;
y1;
uxy1;
dx1=x1(1,2)-x1(1,1);
dy1=y1(1,2)-y1(1,1);
%skaiciuojame pirmos zonos vieno keturkampio plotą
ar1=dx1*dy1;
%skaiciuojame elektrinio lauko stiprumą (sudarome Ex ir Ey matricas)
for m=1:sk-1
    for n=1:sk
        Ex1(n,m)=-(uxy1(n,m+1)-uxy1(n,m))/dx1;
    end
end
for n=1:sk-1
    for m=1:sk
        Ey1(n,m)=-(uxy1(n+1,m)-uxy1(n,m))/dy1;
    end
end
%skaiciuojame gradiento kvadrata
for n=1:sk-1
    for m=1:sk-1
        gr1(n,m)=Ex1(n,m)*Ex1(n,m)+Ey1(n,m)*Ey1(n,m);
    end
end
for n=1:sk-1
    for m=1:sk-1
        E1(n,m)=eps1*8.854*1E-12*ar1*gr1(n,m);
    end
end
E1sum=sum(E1);
E1sumv=sum(E1sum);
uxy1;
Ex1;
Ey1;
%pause
x2=linspace(0.70000000000001,0.899999999,30);
y2=linspace(0.3,0.6,30);
uxy2=tri2grid(p,t,u,x2,y2);
%surf(x2,y2,uxy2)
x2;
y2;
uxy2;
dx2=x2(1,2)-x2(1,1);
dy2=y2(1,2)-y2(1,1);
ar2=dx2*dy2;

for m=1:sk-1
    for n=1:sk
        Ex2(n,m)=-(uxy2(n,m+1)-uxy2(n,m))/dx2;
    end
end
for n=1:sk-1
    for m=1:sk
        Ey2(n,m)=-(uxy2(n+1,m)-uxy2(n,m))/dy2;
    end
end
%skaiciuojame gradiento kvadrata
for n=1:sk-1

```

```

    for m=1:sk-1
gr2(n,m)=Ex2(n,m)*Ex2(n,m)+Ey2(n,m)*Ey2(n,m);
end
end
for n=1:sk-1
    for m=1:sk-1
E2(n,m)=eps2*8.854*1E-12*ar2*gr2(n,m);
end
end
E2sum=sum(E2);
E2sumv=sum(E2sum);
%pause
x3=linspace(0,0.89999999,30);
y3=linspace(0,0.3,30);
uxy3=tri2grid(p,t,u,x3,y3);
%surf(x3,y3,uxy3)x3
y3;
uxy3;
dx3=x3(1,2)-x3(1,1);
dy3=y3(1,2)-y3(1,1);
ar3=dx3*dy3;
for m=1:sk-1
    for n=1:sk
Ex3(n,m)=-(uxy3(n,m+1)-uxy3(n,m))/dx3;
end
end
for n=1:sk-1
    for m=1:sk
Ey3(n,m)=-(uxy3(n+1,m)-uxy3(n,m))/dy3;
end
end
%skaiciuojame gradiento kvadrata
for n=1:sk-1
    for m=1:sk-1
gr3(n,m)=Ex3(n,m)*Ex3(n,m)+Ey3(n,m)*Ey3(n,m);
end
end
for n=1:sk-1
    for m=1:sk-1
E3(n,m)=eps3*8.854*1E-12*ar3*gr3(n,m);
end
end
E3sum=sum(E3);
E3sumv=sum(E3sum);
Cg=2*(E1sumv+E2sumv+E3sumv);
ZBg=1/(3e+8)/sqrt(Cg*C0);
C0
Cg
ZBg
ZB0

```

15 priedas

Lovelinių spiralinių sistemų savybių tyrimo programa

```

script
clear
clc
clear global
format long
diary NSLS_a_8-2.txt
diary on
echo on
date
clock
pi=4*atan(1);
%Pradiniai duomenys
a=0.008
h=0.012
h;
c=h-a;
L=0.0015;
%l=0.0005
%p=0.0004
%dielektriku storis ish abieju pusiu po 0.005
%dielektrine skvarba 1

%diary off
echo off

T=0.01;
kh=T;
skp=kh/h;
sk=zeros(5,1);
sk(1,1)=skp*0.000001;
sk(2,1)=skp*0.5;
sk(3,1)=skp;
sk(4,1)=skp/0.5;
sk(5,1)=skp/0.000001;

Z1p0=51,0491;
Z1pp=51,0491;
Z2p0=54,0789;
Z2pp=52,4023;

Y1p0=1/Z1p0;
Y1pp=1/Z1pp;
Y2p0=1/Z2p0;
Y2pp=1/Z2pp;

dt=zeros(5,1);
Tet=zeros(120,1);
klet=zeros(120,1);
f=zeros(120,1);
ZinR=zeros(120,1);
ZinI=zeros(120,1);
rez=zeros(120,5);

for m=1:120 % Teta (T) keitimo ciklo pradzia
m;
Y1B=Y1p0+(Y1pp-Y1p0)*sin(T/2)^2;
Y2B=Y2p0+(Y2pp-Y2p0)*sin(T/2)^2;
Z1B=1/Y1B;
Z2B=1/Y2B;

```

```

%Sprendinio paieškos iteracijos pradžia
for kl=1:10000
    kl;
    A=zeros(2,2);
    %Determinanto skaičiavimas (5 taskai) arti laukiamo sprendinio
    for i=1:5
        SKA=sin(sk(i,1)*a);
        CKA=cos(sk(i,1)*a);
        SKC=sin(sk(i,1)*c);
        CKC=cos(sk(i,1)*c);
        ej=exp(j*T);

        %pirma lygtis;
        A(1,1)=(Y1B/Y2B)*SKA+SKC*(1/ej); %A11;
        A(1,2)=CKC*(1/ej)-CKA; %A12;

        %antra lygtis;
        A(2,1)=CKA-CKC*(1/ej); %A11;
        A(2,2)=(Y2B/Y1B)*SKA+SKC*(1/ej); %A12;

        dt(i,1)=real(det(A));
    end
    %Ar yra šiame intervale sprendinys
    s(1)=dt(1,1)*dt(2,1);
    s(2)=dt(2,1)*dt(3,1);
    s(3)=dt(3,1)*dt(4,1);
    s(4)=dt(4,1)*dt(5,1);

    %Jei intervale yra sprendinys, siauriname k intervala
    if s(1)<0;
        skmin=sk(1,1);
        skmax=sk(2,1);
    end
    if s(2)<0;
        skmin=sk(2,1);
        skmax=sk(3,1);
    end
    if s(3)<0;
        skmin=sk(3,1);
        skmax=sk(4,1);
    end
    if s(4)<0;
        skmin=sk(4,1);
        skmax=sk(5,1);
    end
    if s(1)>0
        if s(2)>0
            if s(3)>0
                if s(4)>0
                    echo on
                    %nerasta sprendinio
                    dt %determinantas
                    T
                    % pause(1)
                    echo off
                    break
                end
            end
        end
    end
end

%Intervalo paieškos pabaiga
skvid=(skmin+skmax)/2;
sk(1,1)=skmin;

```

```

sk(2,1)=(skmin+skvid)/2;
sk(3,1)=skvid;
sk(4,1)=(skvid+skmax)/2;
sk(5,1)=skmax;

delta=(skmax-skmin)/skvid;

if delta<0.0000000000001;
    skg=skvid;
    %Jei nera sprendinio, neranda kg
    break
end
    %Jei tenkinamas tikslumas, iseinama is ciklo (kl)

    echo off
end %Priartėjimo ciklo (kl) pabaiga
%
%Letinimo koeficiento ir dažnio skaičiavimas
klet(m)=T/(skg*L);
f(m)=0.3*skg/2/pi;
%Iėjimo varžos skaičiavimas
%Zb, kai x=0

Zb0=((Y1B/Y2B)*SKA+SKC*(1/ej))/(j*Y1B*(CKC*(1/ej)-CKA));

Zin=Zb0;
ZinR(m)=real(Zin);
ZinI(m)=imag(Zin);
Z(m)=abs(Zin);
Tet(m)=T;

rez(m,1)=m;
rez(m,2)=Tet(m);
rez(m,3)=f(m);
rez(m,4)=klet(m);
rez(m,5)=Z(m);

T=T+0.05;

skapyt=(T/klet(m))/L;

sk(1)=0.9*skapyt;
sk(2)=0.95*skapyt;
sk(3)=skapyt;
sk(4)=skapyt/0.95;
sk(5)=skapyt/0.9;

end
%Teta keitimo ciklo (m) pabaiga
%diary on
rez
diary off
echo on
plot(f,klet)
echo off
pause
echo on
plot(f,ZinR)
pause
plot(f,ZinI)
pause
plot(f,Z)
echo off
end

```

Padėka

Esu labai dėkingas savo disertacinio darbo vadovui profesoriui Stanislovui Štarui. Jo pagalba, konsultacijos, patirtis ir bendradarbiavimas man labai padėjo atlikti šį darbą. Didžiausia dalimi dėka profesoriaus pastangų ir skatinimo pradėjau ir nepasiklydau sudėtingame mokslo kelyje.

Už pagalbą ir bendradarbiavimą taip pat noriu padėkoti VGTU Elektronikos fakulteto dėstytojams profesoriams Romanui Martavičiui, Juliui Skudučiui, docentui Vytautui Urbanavičiui, daktarui Vladislavui Daškevičiui.

Dėkoju savo tėvams, broliui ir žmonai už supratimą, palaikymą ir dėmesį rengiant šį man labai svarbų disertacinį darbą.

T. Burokas