

Lėtinimo ir kreipimo sistemų ir jų jungių modeliavimas ir tobulinimas

S. Štaras, T. Burokas

Radioelektronikos katedra, Vilniaus Gedimino technikos universitetas

Naugarduko g. 41, 03227 Vilnius, Lietuva, tel. (85) 2744755; el. paštas staras@el.vtu.lt

Įvadas

Aukštadažnių traktų savybės ir praleidžiamųjų dažnių juosta 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 skaitinių metodų taikymas [1, 2].

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 sistemų ir aukštadažnių traktų sąsajos klausimas. Tiesa, daugeliu atveju svarbu, kad lėtinimo sistema būtų gerai suderinta su aukštadažnių 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 šimtų megahercų ar net dešimčių gigahercų.

Lėtinimo sistemų galuose dėl elektrinio lauko sklaidos susidaro talpinio pobūdžio reaktyvumai. Siekiant šiuos reaktyvumus sumažinti, [3–7] pasiūlyta siaurinti kraštines spiralinių ir meandrinių lėtinimo 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 sistemos ir plačiajuosčio trakto sąsajos galimybę patvirtino modeliavimas ir skaičiavimai [2], 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, [2] 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 į kreipimo sistemos pradžią [5, 6]. Pagaliau [2] sprendžiamas reaktyvumų lėtinimo sistemos galuose kompensavimo klausimas. Žinoma, kad reaktyvumų įtaką įmanoma kompensuoti tik palyginti siaurame dažnių ruože. Todėl plačiajuosčių traktų atveju geriau nagrinėti ne kaip kompensuoti reaktyvumus, o kaip jų išvengti.

Šio darbo tikslas – atskleisti reiškinius plačiajuosčių traktų ir lėtinimo ir kreipimo sistemų jungėse, išsiaiškinti šių jungių ir bėgančiosios bangos elektroninių vamzdžių

kreipimo sistemų tobulinimo galimybes. Siekdami šio tikslo, 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.

Signalinio trakto modelis

Sakykime, kad bėgančiosios bangos elektroninio vamzdžio signaliniame trakte yra spiralinė kreipimo sistema, kurios išvadai yra juostelinės linijos atkarpos. Tokio trakto fragmentas atvaizduotas 1 paveiksle. 2 paveikslas, *a*, vaizduoja daugialaidės linijos, modeliuojančios spiralinę kreipimo sistemą, pjūvio fragmentą. 2 paveiksle, *b*, pateiktas juostelinės linijos pjūvio vaizdas. Pagaliau 2 paveiksle, *c*, atvaizduotas daugialaidės linijos, modeliuojančios spiralės galines vijas, pjūvio fragmentas.

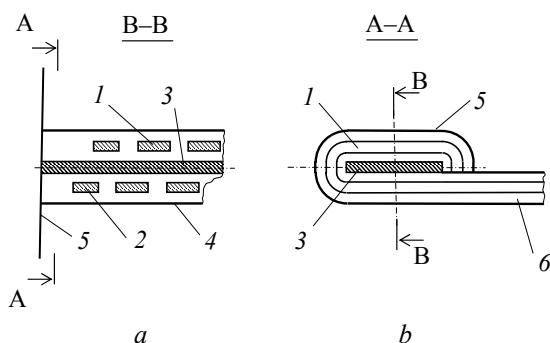
Spiralinės sistemos, modeliuojamos vieneile daugialaide linija (2 pav., *a*), banginė varža, kaip žinoma [5–7], išreiškiama formule

$$Z_B(\theta) = 1/Y_B(\theta); \quad (1)$$

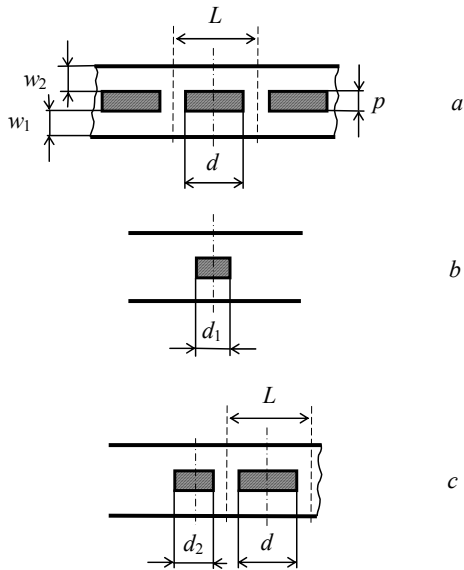
$$Y_B(\theta) = Y_B(0) + [Y_B(\pi) - Y_B(0)] \sin^2(\theta/2); \quad (2)$$

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

Banginius laidumus $Y_B(0)$, $Y_B(\pi)$, juostelinės linijos banginį laidumą Y_{BL} ir jos banginę varžą $Z_{BL} = 1/Y_{BL}$



1 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



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

galima pakankamai tiksliai apskaičiuoti taikant baigtinių skirtumų metodą [8]. Spiralinės galinės vijos banginių 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

$$Z_{BV}(\theta) = 1/Y_{BV}(\theta); \quad (3)$$

$$Y_{BV}(\theta) = Y_{BL}^V / 2 + Y_B^V / 2; \quad (4)$$

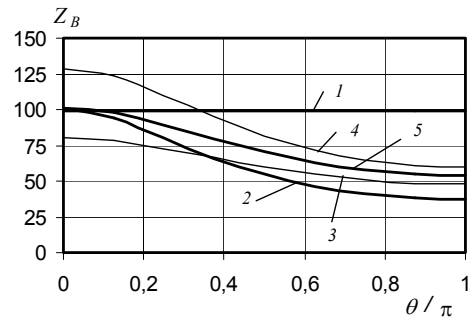
čia Y_{BL}^V ir Y_B^V – juostelinės linijos ir vieneilės daugialaidės linijos banginiai laidumai, kai centrinio laidininko plotis d_2 toks kaip galinės vijos (2 pav., c).

Siekdami, kad vaizdžiau atsiskleistų reiškiniai kreipimo sistemos jungėse, nagrinėkime padidintos (100 Ω) banginės varžos traktą, kuriame panaudota iš palyginti storo laidininko padaryta spiralė – tuomet spiralės galuose susidaro didesnė elektrinio lauko sklaida.

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 |

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 lentelėje. Skaičiuojant spiralinės sistemos bangines varžas, tariama, kad $L = 2$ mm, $d = 1,5$ mm. Nagrinėti trys galinių vijų



3 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

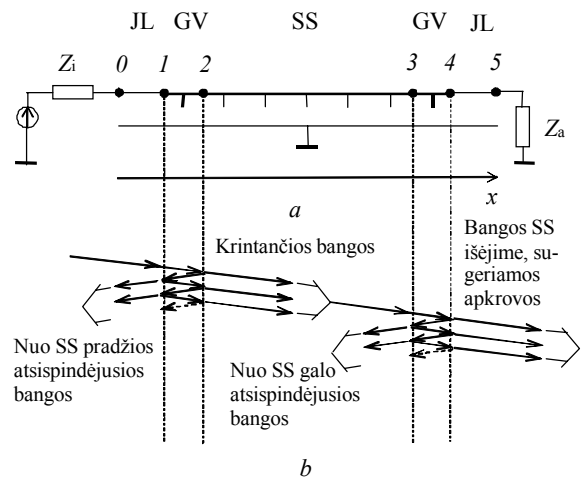
variantai: pirmas, kai galinės vijos plotis toks pat kaip kitų spiralės vijų plotis (galinės vijos nesusiaurintos); antras, kai galinės vijos plotis toks pat kaip juostelinės linijos centrinio laidininko plotis; trečias, kai galinės vijos plotis toks, kad šią viją atitinkančios ilgosios linijos banginė varža žemųjų dažnių srityje artima 100 Ω.

3 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 ($k_L \cong L_v / L$; čia L_v – vijos ilgis) ir fazės kampą θ su dažniu f sieja priklausomybė

$$\theta = 2\pi f t_v \cong 2\pi f \cdot (L_v / c) = 2\pi f \cdot (k_L L / c); \quad (5)$$

čia t_v – vėlinimo trukmė vijoje; c – šviesos greitis vakuume.

Atsižvelgdami į signalinio trakto sandarą, galime taikyti jo modelį, atvaizduotą 4 paveiksle, a. Tada, kaip ir



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

[5, 6], pasinaudodami daugkartinių atspindžių diagrama, galime rasti atspindžio koeficientų ir perdavimo funkcijų išraiškas, apibūdinančias tiriamųjų signalų dažninius iškrypimus.

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

$$\underline{p}_{12} = p_1 + p_2(1 - p_1^2) \exp(-j2\omega t_{12}) / \underline{v}_{12}. \quad (6)$$

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

$$\underline{K}_{IN0} = \underline{K}_{12\Sigma} = (1 + p_1)(1 + p_2) / \underline{v}_{12}. \quad (7)$$

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

$$\underline{K}_{IN\Sigma} \cong \underline{K}_{IN0}(1 + \underline{p}_{340}\underline{p}_{210} \exp(-j2\omega t_{23})); \quad (8)$$

čia t_{23} – vėlinimo trukmė 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:

$$\underline{p}_{340} = p_3 + p_4(1 - p_3^2) \exp(-j2\omega t_{34}) / \underline{v}_{34}, \quad (9)$$

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

$$\underline{p}_{210} = -p_2 - p_1(1 - p_2^2) \exp(-j2\omega t_{12}) / \underline{v}_{12}. \quad (10)$$

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

$$\underline{K}_{IS0} = \underline{K}_{12\Sigma} \underline{K}_{34\Sigma}; \quad (11)$$

čia perdavimo funkcija $\underline{K}_{34\Sigma}$ apibūrina dažninius iškrypimus dėl netolygumų sistemos gale ir išreiškiamas formule:

$$\underline{K}_{34\Sigma} = (1 + p_3)(1 + p_4) / \underline{v}_{34}. \quad (12)$$

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

$$\underline{K}_{IS\Sigma} \cong \underline{K}_{IN\Sigma} \underline{K}_{34\Sigma}. \quad (13)$$

Kiti (6)–(13) įrašyti ir dar neaptarti dydžiai išreiškiami formulėmis:

$$p_1 = (Z_{BV}(\theta) - Z_{BL}) / (Z_{BV}(\theta) + Z_{BL}); \quad (14)$$

$$p_2 = (Z_B(\theta) - Z_{BV}(\theta)) / (Z_B(\theta) + Z_{BV}(\theta)); \quad (15)$$

$$p_3 = (Z_{BV}(\theta) - Z_B(\theta)) / (Z_{BV}(\theta) + Z_B(\theta)) = -p_2; \quad (16)$$

$$p_4 = (Z_{BL} - Z_{BV}(\theta)) / (Z_{BL} + Z_{BV}(\theta)) = -p_1; \quad (17)$$

$$\underline{v}_{12} = 1 + p_1 p_2 \exp(-j2\omega t_{12}); \quad (18)$$

$$\underline{v}_{34} = 1 + p_3 p_4 \exp(-j2\omega t_{34}). \quad (19)$$

Taikydami (6)–(19) ir siekdami atskleisti kreipimo sistemos jungių įtaką elektroninio vamzdžio dažninėms ir pereinamosioms charakteristikoms, laikėme, kad signalų šaltinis ir apkrova (4 pav., a) suderinti su juostelinėmis linijomis, t.y. $Z_i = Z_{BL}$ ir $Z_a = Z_{BL}$.

Skaičiavimų rezultatai ir jų analizė

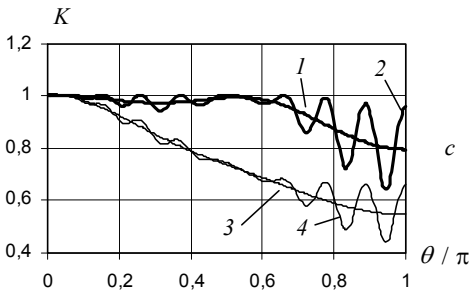
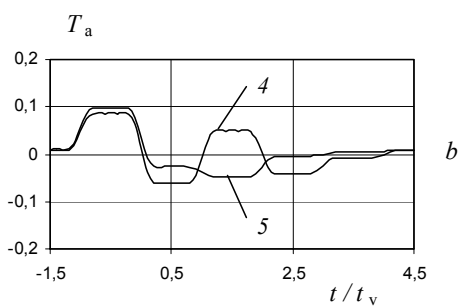
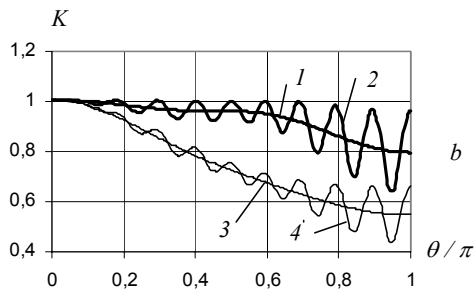
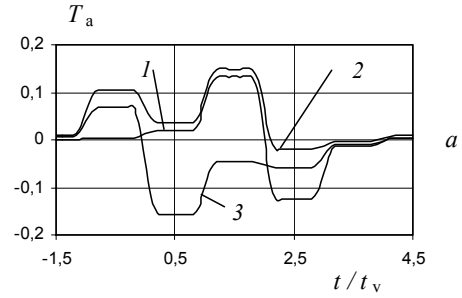
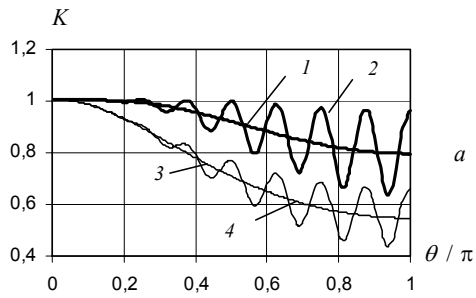
5 paveiksle, a – e, pateiktos amplitudės dažninės charakteristikos, apibūdinančios dažninius iškrypimus signaliniame trakte ir bėgančiosios bangos elektroniniame vamzdyje. 1 ir 2 kreivės apskaičiuotos taikant (11) ir (13) formules, 3 ir 4 kreivės – taikant (7) ir (8) formules. Taigi skaičiuojant 1 ir 3 charakteristikas taikytos (7) ir (11) formulės – nevertinti pakartotiniai atspindžiai nuo spiralinės kreipimo sistemos galų. Virpamąjį 2 ir 4 kreivių pobūdį lemia pakartotiniai atspindžiai.

Apskaičiuojant 5 paveikslo, a, charakteristikas, padaryta prielaida, kad galinės kreipimo sistemos vijos nesukelia netolygumų ($Z_{BV}(\theta) = Z_{BL}$). 5 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 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 paveikslo, c, charakteristikas.

Lyginant 5 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 $\underline{K}_{IS\Sigma}$ 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 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 efektas buvo pastebėtas [2]. Jį galime paaiškinti tuo, kad aptariamomis sąlygomis galinės susiaurintos vijos atlieka ketvirčio bangos ilgio suderinimo transformatoriaus vaidmenį, kai $\theta = \pi$.

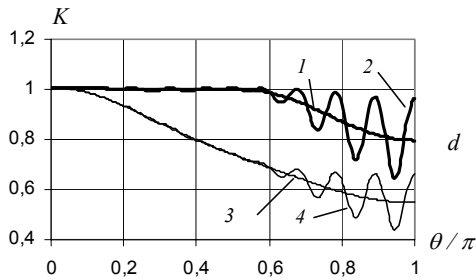
6 paveiksle pateiktos virpesių, atsispindėjusių nuo kreipimo sistemos pradžios, kai traktas zondojuamas vienetiniu įtampos šuoliu, laikinės diagramos. Jas skaičiuojant panaudota atspindžio koeficiento išraiška (6) ir žinomas sąryšis tarp pereinamosios charakteristikos ir perdavimo funkcijos. Siekiant išvengti laikinių charakteristikų osciliacijų dėl baigtinio viršutinio integravimo režio, į pointegralinį reiškinį, kaip ir [6], buvo įtrauktas Bernšteino ir Rogozinskio daugiklis.

6 paveikslo, a, b, kreivės apskaičiuotos tiems patiems signalinio trakto atvejams, kaip ir 5 paveikslo amplitudės dažninės charakteristikos. Jos vaizdžiai patvirtina eksperimentinių tyrimų [6] išvadą, kad susiaurinus galines kreipimo sistemos vijas įmanoma sumažinti atsispindėjusių virpesių lygį. Minimalūs atspindžiai gaunami (5 kreivė),

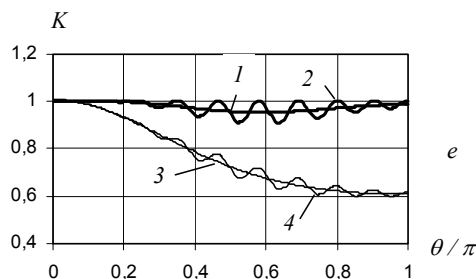


6 pav. Atspindėję virpesiai, kai $Z_{BV}(\theta) = Z_{BL}$ (1 kreivė), $\omega t_{12} = \omega t_{34} = \theta$, $d_2 = 1,5; 0,6; 1$ mm (2–4 kreivės) ir $\omega t_{12} = \omega t_{34} = \theta/2$, $d_2 = 1$ mm (5 kreivė)

kai trakto nevienalyčių atkarpų (jungčių) ilgiai 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 kreipimo sistemoje, krintančiųjų bangų amplitudės sistemoje nekinta – išlieka tokios pat kaip šių bangų amplitudės sistemos pradžioje. Taigi tiriamųjų signalų formos dažninius iškreipimus apibūdina perdavimo funkcijų \underline{K}_{INO} ir \underline{K}_{INS} moduliai – amplitudės dažninės charakteristikos, atvaizduotos 5 paveiksle, a – e, 3 ir 4 kreivėmis. Palyginus grafikus matyti, kad bėgančiosios bangos elektroninio vamzdžio amplitudės dažninės charakteristikos vidutinis lygis beveik nepriklauso nuo kreipimo sistemos jungčių konstrukcijos. Todėl nuo jungčių konstrukcijos, galima sakyti, nepriklauso ir perdavimo funkciją \underline{K}_{INO} atitinkančios pereinamosios charakteristikos forma, ir kilimo trukmė (7 pav.). Dar mažiau jungčių įtaka pastebima atsižvelgus į lėkio reiškinį, kurio įtaka įvertinama perdavimo funkcija [5, 6]



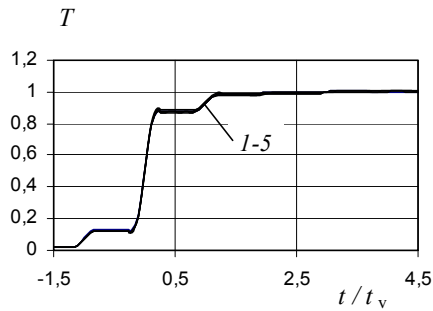
$$\underline{K}_t = \frac{\sin x}{x} e^{-jx}; \quad (20)$$

čia $x \cong \omega t_v / 2$.

Pastarąją mintį iliustruoja bėgančiosios bangos elektroninio vamzdžio pereinamosios charakteristikos, apskaičiuotos įvertinant jungčių ir lėkio efekto įtaką, atvaizduotos 8 paveiksle.

Kita vertus, reikia pripažinti, kad parinkus optimalų galinių vijų plotį, įmanoma sumažinti perdavimo funkcijos

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



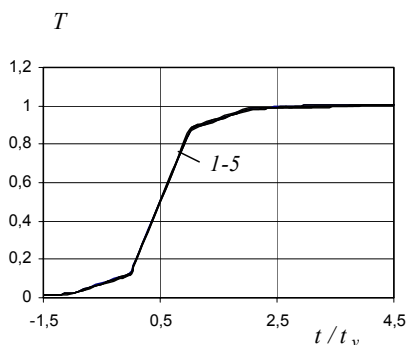
7 pav. Perdavimo funkciją K_{IN0} atitinkančios pereinamosios charakteristikos, apskaičiuotos, kai $Z_{BV}(\theta) = Z_{BL}$ (1 kreivė), $\omega t_{12} = \omega t_{34} = \theta$, $d_2 = 1,5; 0,6; 1$ mm (2–4 kreivės) ir $\omega t_{12} = \omega t_{34} = \theta/2$, $d_2 = 1$ mm (5 kreivė)

$K_{IN\Sigma}$ virpėjimą (5 paveikslas, $a - e$, 4 kreivės), vadinasi, ir vamzdžio pereinamosios charakteristikos plokščiosios dalies netolygumą, kuri lemia virpesiai, atsispindėję nuo kreipimo sistemos galo ir dar pakartotinai nuo jos pradžios.

Iš charakteristikų aptarimo išplaukia išvada, kad 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 kreipimo sistemos banginė varža mažiau priklausytų nuo dažnio.

Signalinių traktų ir kreipimo sistemų tobulinimo galimybės

Bėgančiosios bangos elektroninių vamzdžių kreipimo sistemoms pirmiausia keliamas elektromagnetinės bangos fazinio greičio mažos dispersijos reikalavimas [5, 6]. Šiuo požiūriu geros yra spiralinių sistemų savybės. Tačiau spiralinių sistemų banginė varža, kaip galėjome dar kartą įsitikinti, labai priklauso nuo dažnio. Dėl banginės varžos



8 pav. Perdavimo funkciją $K_{EV} = K_{IN0}K_t$ atitinkančios pereinamosios charakteristikos, apskaičiuotos, kai $Z_{BV}(\theta) = Z_{BL}$ (1 kreivė), $\omega t_{12} = \omega t_{34} = \theta$, $d_2 = 1,5; 0,6; 1$ mm (2–4 kreivės) ir $\omega t_{12} = \omega t_{34} = \theta/2$, $d_2 = 1$ mm (5 kreivė)

kitimo pereinamoji charakteristika, apibūdinanti įtampą, patenkančią į spiralinę kreipimo sistemą, kyla laipteliais (7 pav.). Remdamiesi [6] galime rasti, kad didžiausio laiptelio aukštis (kai $t \cong 0$) išreiškiamas formule:

$$B \cong \frac{4Z_B(\pi)}{3Z_B(\pi) + Z_B(0)}. \quad (21)$$

Taigi siekdami mažesnių dažninių iškraipymų ir geresnės pereinamosios charakteristikos formos ($B \rightarrow 1$), turime siekti, kad $Z_B(\pi)$ būtų artimesnė $Z_B(0)$. Banginės varžos kitimą, kaip žinoma [5–7], 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.

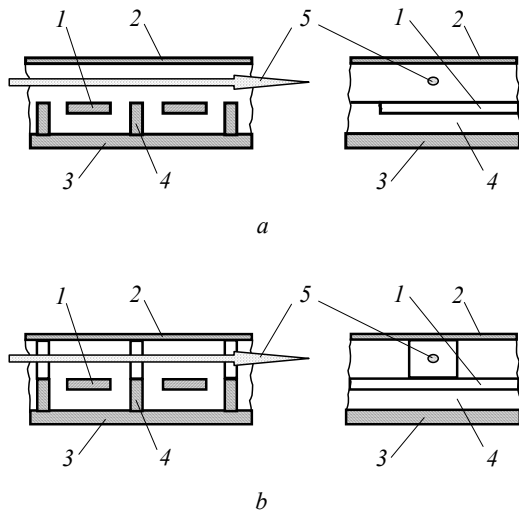
Didėjant dažniui, mažai kinta meandrinė sistema banginė varža [5, 10]. Paprasčiausios meandrinės sistemos atveju maksimalios (kai $\theta = 0$) ir minimalios (kai $\theta = \pi/2$) banginių varžų santykį galime išreikšti formule:

$$\frac{Z_{B\max}}{Z_{B\min}} = \frac{Z_B(0) + Z_B(\pi)}{2\sqrt{Z_B(0)Z_B(\pi)}}. \quad (22)$$

Nesunku įsitikinti, kad šis santykis daug mažesnis nei spiralinės sistemos maksimalios ir minimalios banginių varžų santykis ($Z_B(0)/Z_B(\pi)$). Kai $Z_B(0)/Z_B(\pi) \cong 3$ (kaip nagrinėtos spiralinės kreipimo sistemos atveju), meandrinės sistemos $Z_{B\max}/Z_{B\min} \leq 1,15$. Todėl meandrinės 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 kreipimo sistemas, įmanoma gauti geresnes vamzdžių amplitudės dažnines charakteristikas. Tačiau meandrinės 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 kreipimo sistemos vijų. Šis ryšys sumažėja, kai tarp vijų yra ekranuojančios sienelės. Tada mažiau aktualus tampa 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 superplačiajuosčių bėgančiosios bangos kreipimo sistemos su ekranuojančiosiomis sienelėmis tarp vijų tipai. Vieną jų grupę sudaro lovelinės spiralinės ir meandrinės sistemos (9 pav., a). Dėl riboto ekranuojančiųjų sienelių aukščio tokiose sistemose nepavyksta visiškai išvengti ryšio tarp gretimų vijų [11]. Kitą grupę sudaro spiralinės ir meandrinės kreipimo sistemos (9 pav., b), kuriose ekranuojančiosios sienelės jungia vidinį ir išorinį ekranus [12, 13]. Taip galima



9 pav. Superplčiajuosčių kreipimo sistemų pjūvių fragmentai:
1 – spiralės arba meandro formos laidininkas; 2, 3 – ekranai;
4 – ekranuojančioji sienelė; 5 – elektronų pluoštas

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 kreipimo sistemose turi būti angos elektroniniam pluoštui. Dėl angų susidaro periodiniai signalinio trakto netolygumai. Tokie netolygumai turi neigiamos įtakos kreipimo sistemos charakteristikoms [14]. Norint atskleisti ekranuojančiųjų sienelių konstrukcijos įtaką kreipimo sistemų ir elektroninių vamzdžių charakteristikoms, reikalingi papildomi tyrimai.

Išvados

1. Lėtinimo 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 sistemos galų ir gauti tolygią trakto amplitudės dažninę charakteristiką, nors lėtinimo sistemos banginė varža, didėjant dažniui, sumažėja net keletą kartų.
2. Bėgančiosios bangos elektroninio vamzdžio dažninės ir pereinamoji charakteristikos mažai priklauso nuo kreipimo sistemos jungių. Norint gauti platesnę vamzdžio praleidžiamų dažnių juostą ir pereinamosios charakteristikos kilimo trukmę, reikia siekti, kad kreipimo sistemos banginė varža mažiau priklausytų nuo dažnio.

3. Siekiant, kad, didėjant dažniui, mažai kistų elektromagnetinės bangos greitis, kreipimo sistemos banginė varža ir lengviau būtų sprendžiami sistemos sąsajos su signaliniu traktu klausimai, tarp kreipimo sistemos spiralės ar meandro vijų reikia sudaryti ekranuojančiąsias sienelės.

Autoriai dėkoja bendradarbiams prof. R. Martavičiui ir prof. J. Skudučiui už naudingas diskusijas, pastabas ir pasiūlymus.

Literatūra

1. **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.
2. **Skudutis J., Daškevičius V.** Lėtinimo ir kreipimo sistemos įėjimo varžos tyrimas // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2002. – Nr. 7(42). – P. 13–17.
3. **Guillaume A., Loty Ch.** Perfectionnements aux lignes a retard // Brevet d'invention No 1465559 (France).
4. **Cristie A. B., Correll R. E.** Traveling wave deflector for electron beams // Patent No 4093891 USA).
5. **Вайнорис З., Кирвайтис Р., Штарас С.** Электродинамические задерживающие и отклоняющие системы. – Вильнюс: Мокслас, 1986. – 266 с.
6. **Штарас С., Вайнорис З., Маргавичюс Р., Скудутис Ю., Станкунас Й.** Широкополосные тракты осциллографических электронно-лучевых трубок бегущей волны. – Вильнюс: Техника, 1993. – 360 с.
7. **Силин Р.А., Сазонов В.П.** Замедляющие системы. – Москва: Сов. радио, 1968. – 632 с.
8. **Kleiza A., Štaras S.** Daugialaidžių linijų banginių varžų skaičiavimas // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 1999. – Nr. 4(22). – P. 41–44.
9. **Štaras S., Skudutis J.** Travelling-wave deflecting systems // Software for Electrical Engineering Analysis and Design. – Boston, Southampton: WITPRESS, 1999. – P. 23–32.
10. **Martavičius R.** Elektrodinaminės planarinės lėtinimo sistemos plačiajuosčiams elektroniniams prietaisams. – Vilnius: Technika, 1996. – 264 p.
11. **Štaras S., Kleiza A.** Lovelinių lėtinimo sistemų analizė ir savybės // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 1999. – Nr. 2(20). – P. 38–41.
12. **Norris N. J., Hudson C. L.** Shielded helix traveling-wave cathode-ray tube deflection structure // Patent No 5172029 (USA).
13. **Hudson C. L., Spector J.** Shielded serpentine traveling-wave tube deflection structure // Patent No 5376864 (USA).
14. **Štaras S., Burokas T.** Nevienalytės spiralinės sistemos savybės. // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2003. – Nr. 1(43). – P. 17–20.

Pateikta spaudai 2003 10 02

S. Štaras, T. Burokas. Lėtinimo ir kreipimo sistemų ir jų jungių modeliavimas ir tobulinimas // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2004. – Nr. 1(50). - P. 9-15.

Nagrinėjama lėtinimo 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. Remiantis amplitudės dažnių ir pereinamųjų charakteristikų skaičiavimo rezultatais parodyta, kad lėtinimo 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 sistemos galų ir gauti tolygią trakto amplitudės dažninę charakteristiką, nors lėtinimo sistemos banginė varža, didėjant dažniui, sumažėja net keletą kartų. Bėgančiosios bangos elektroninio vamzdžio amplitudės dažninė ir pereinamoji charakteristikos mažai priklauso nuo kreipimo sistemos jungių. Norint gauti platesnę vamzdžio praleidžiamų dažnių juostą ir mažesnę pereinamosios charakteristikos kilimo trukmę reikia siekti, kad kreipimo sistemos banginė varža mažiau priklausytų nuo dažnio. Siekiant, kad didėjant dažniui mažai kistų elektromagnetinės bangos greitis, kreipimo sistemos banginė varža ir lengviau būtų sprendžiami sistemos sąsajos su signaliniu traktu klausimai, tarp kreipimo sistemos spiralės ar meandro vijų reikia sudaryti ekranuojančiąsias sienes. Il. 9, bibl. 14 (lietuvių kalba; santraukos lietuvių, anglų, rusų k.).

S. Štaras, T. Burokas. Modelling and Improvement of the Travelling-Wave Deflection Systems and their Transitions // Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technologija, 2004. – No. 1(50). - P. 9-15.

The super-wide-band electrical circuits containing slow-wave structures are considered in order to improve frequency and step responses of the circuits and electronic devices. The model of the circuit, containing elements, modelling the transitions between travelling-wave deflection systems and strip-lines, is proposed and the expressions for reflection coefficients and transfer functions are derived using the diagrams of multiple reflections. The calculated amplitude frequency and step responses of the super-wide-band electrical circuits and travelling-wave tubes are presented and analysed. Transitions of the deflection structures can act as the forth wave length matching elements improving frequency and step responses of the super-wide-band electrical circuits. At the same time it is impossible to improve the frequency and step responses of the travelling-wave tube using the forth wave length matching elements because characteristics of the tubes depend on the amplitude of the wave propagating along the deflecting system. We must decrease the change of the characteristic impedance of the deflection system in order to improve frequency and step responses of the travelling-wave cathode-ray tube. The travelling-wave deflection systems containing the shields between the wires of the helical or meander deflecting electrodes are recommended for the super-wide-band travelling-wave tubes. The shields decrease the coupling between the wires and the characteristic impedance and the phase velocity in the travelling-wave deflection system become less dependent on frequency. Ill. 9, bibl. 14 (In Lithuanian; summaries in Lithuanian, English, Russian).

С. Штарас, Т. Бурокас. Моделирование и возможности совершенствования отклоняющих систем и их переходов // Электроника и электротехника. – Каунас: Технология, 2004. – № 1(50). - С. 9-15.

Рассматривается влияние переходов между отклоняющими системами бегущей волны и другими элементами сверхширокополосного сигнального тракта на частотные характеристики тракта и электронно-лучевых трубок бегущей волны с целью выявления возможностей и путей совершенствования замедляющих-отклоняющих систем и их переходов. Составлена модель (эквивалентная схема) сигнального тракта. С использованием диаграммы многократных искажений получены выражения коэффициентов отражения и передаточных функций. В результате расчетов и анализа их результатов показано, что суженные крайние витки отклоняющей системы могут выполнять роль согласующих четвертьволновых трансформаторов. При правильном выборе волновых сопротивлений и длин этих витков можно обеспечить равномерность амплитудно-частотной характеристики сигнального тракта даже в случае, когда волновое сопротивление с увеличением частоты уменьшается в несколько раз. Однако амплитудно-частотная и переходная характеристики трубки бегущей волны мало зависят от согласующих переходов. Для улучшения этих характеристик необходимо уменьшать изменение волнового сопротивления отклоняющей системы. Уменьшению изменения волнового сопротивления и дисперсии фазовой скорости электромагнитной волны в спиральных и меандровых отклоняющих системах способствуют экранирующие стенки между витками отклоняющей системы. Ил. 9, библи. 14 (на литовском языке; рефераты на литовском, английском и русском яз.).

DOI: 10.5755/j02.eie.10994