

## Spiralinės lėtinimo sistemos savybių tyrimas programų paketu „MicroWave Studio“

**J. Skudutis, V. Daškevičius**

*Kompiuterių inžinerijos katedra, Vilniaus Gedimino technikos universitetas,  
Naugarduko g. 41, LT – 03227 Vilnius, Lietuva, tel. +370 5 2744767, el. p.: julius.skudutis@el.vtu.lt;  
v.daskevicius@lietuvosdujos.lt*

### Įvadas

Mikrobangų įtaisams projektuoti vis plačiau taikomi skaitmeniniai metodai. Tam yra sukurti specializuoti programų paketai [1]. Šio darbo autoriai plokščioms spiralinėms sistemoms modeliuoti kurį laiką taikė firmos „Applied Wave Research“ superaukštųjų dažnių įtaisų projektavimo programų paketą „Microwave Office“ [2,3], nors šio paketo modulis „EMSight“ yra pritaikytas planarinės struktūros komponentams. Ištempto stačiakampio skerspjūvio spiralė buvo modeliuojama dviejų laidininkų sluoksnių sistema, kurioje trumpikliais tarpusavyje sujungti viršutinio ir apatinio sluoksnių laidininkai.

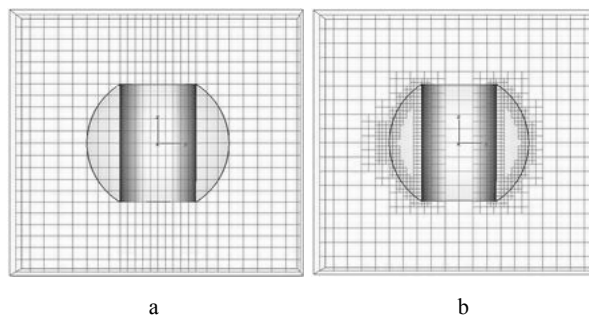
Vienu iš didžiausių šio paketo trūkumų laikytina tai, kad jam reikia didelių skaičiavimo technikos išteklių: operatyviosios kompiuterio atminties ir skaičiavimo laiko. Be to, jis neįvertina atskirus modelio sluoksnius jungiančių elementų: plokščios spiralės laidininkų šoninių dalių, išorinių ir vidinių spiralės ekranus jungiančių trumpiklių, dielektrinių spiralės laikiklių ir kitų elementų įtakos. Dėl to sudėtingoms spiralinėms sistemoms tirti naudotini trimačio modeliavimo programų paketai.

### Trumpa trimačio modeliavimo paketo „MicroWave Studio“ charakteristika

Programų paketas „MicroWave Studio“ yra pati šiuolaikiškiausia trimačio elektromagnetinio modeliavimo sistema [4]. Puikus vartotojo interfeisas, galingi geometrinų modelių braižymo įrankiai ir ypač našus skaičiavimo branduolys leidžia gerokai sutrumpinti projektavimo trukmę. „CST“ MWS programa taiko baigtinių integralų metodą (FIT), kuris, įvertindamas energijos tvermės dėsnį, iš pradžių aprašo Maksvelo erdvinio tinklelio lygtis, o po to formuoja specifines diferencialines lygtis (banginę arba Puasono). Metodus gali būti įgyvendintas dažnių arba laiko srityse. Įtaiso skaidymo tinkleliui apribojimų nėra: greta įprasto stačiakampio

tinklelio Dekarto koordinatų sistemoje palaikomi ir nestaciai kampiai tinkleliai, pavyzdžiui, tetraedrinis.

Baigtinių integralų metodas laiko srityje efektyviausias tada, kai naudojamas stačiakampis skaidymo tinklelis. Bet kokios formos tūrinių struktūrų modeliavimui pagerinti yra sukurtas originalus aproksimacijos būdas idealioms ribinėms sąlygoms (Perfect Boundary Approximation, PBA). Šis būdas leidžia kubinę tinklelio ląstelę suskaidyti į dvi dalis taip, kad skaidymo riba sutaptų su dviejų skirtingų aplinkų skiriamąja riba ir atspindėtų realią modeliuojamos struktūros geometriją (1 pav., a).



**1 pav.** Sferos skaidymo PBA (a) ir MSS (b) metodu tinklelio pavyzdys

Šio būdo galimybes išplėtė plonų sienelių metodas (Thin Sheet Technique, TST), leidžiantis optimaliai pateikti dvi kubinės tinklelio 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 tinkleliu (1 pav., b). PBA ir TST metodai galioja ir susmulkintiems tinklelio elementams. Tai dar padidina analizės tikslumą. Nors vartotojas gali

lengvai pakeisti tinklę, norėdama tiksliau aprašyti objektą kritinėse modeliuojamos struktūros srityse, sistema, padedama specialios eksperimentinės sistemos, automatiškai parenka optimalų tinklę.

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, nereikalaujantis smulkiausio skaidymo tinklę. Metodas taip pat leidžia įvertinti metalinių sluoksnių arba mikrojuostelių linijų storį papildomai nesuskaidytoje tinklę skiltyje.

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.

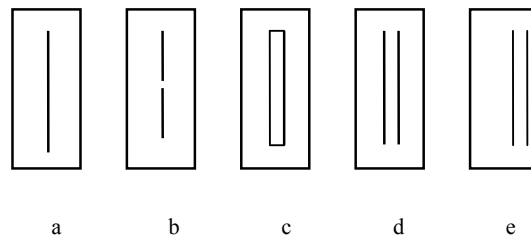
Skaičiavimo branduolys dažnių ašyje (Frequency Domain Solver) turi adaptyvų dažnių svyravimo algoritmą, leidžiantį gauti tikslas charakteristikas esant minimaliam, automatiškai pasirinktam dažnių taškų skaičiui. Ypač daug dėmesio skiriama modų skaičiavimui sistemos prievaduose, įvertinant nuostolius medžiagose. Skaičiavimo branduolys yra pritaikytas lėtinimo sistemoms tirti, kadangi palaiko periodines ribines sąlygas.

Pirminis modeliavimo rezultatas yra apibendrinti sklaidos matricos parametrai (S parametrai) bet kokiam modų skaičiui kiekviename įėjime. Apskaičiuotieji S parametrai gali būti pateikti įvairia forma: grafikais, lentelėse arba išsaugoti faile Touchstone formatu, leidžiančiu duomenis panaudoti schemų modeliavimo programose. Be S parametru, „CST“ MWS programa leidžia sudaryti ekvivalentinę tiriamo įrenginio schemą SPICE formatu.

### Vidinių anizotropinių ekranų įtakos tyrimas

Žinoma, kad pagrindinis veiksnys, ribojantis spiralinės lėtinimo sistemos praleidžiamųjų dažnių juostą, yra fazinio vėlinimo laiko dispersija [5]. Koreguoti fazinio vėlinimo laiko dažninę priklausomybę galima naudojant anizotropinius ekranus. Šiame darbe „CST“ MWS programa tyrė vidinių anizotropinių ekranų įtaką spiralinės sistemos charakteristikoms. Tirtų spiralinių sistemų skerspjūviai yra pateikti 2 paveiksle. Spiralės ir vidinių ekranų matmenys buvo parinkti tokie, kad būtų galima gauti sistemos banginę varžą  $\sim 100 \Omega$  ir lėtinimo koeficientą  $\sim 12,5$ . Šie parametrai gauti panaudojant 42 mm ilgio sistemą: spiralės žingsnis  $L = 2$  mm, vijos plotis  $l = 1$  mm, spiralės plotis  $h = 10$  mm, spiralės aukštis  $b = 2,5$  mm. Atstumas tarp dviejų lygiagrečių vidinio ekrano plokštelių lygus ištinio vidinio ekrano storiui  $\sim 0,7$  mm.

Spiralinės lėtinimo sistemos tyrimo schema labai paprasta: nubraižomas sistemos konstrukcijos brėžinys panaudojant sistemos vidinį grafinį redaktorių masteliu 1:1 ir nurodomi signalo šaltinio ir apkrovos prijungimo prievadai. Fazinės vėlinimo trukmės ir banginės varžos

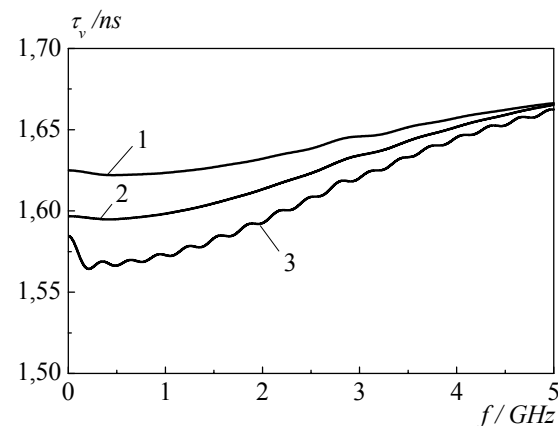


**2 pav.** Tirtų spiralinių lėtinimo sistemų skerspjūviai (išorinis ekranas neparodytas): a – vidinis ištinis simetriškai su spirale pastatytas ekranas; b – vidinis simetriškai su spirale pastatytas ekranas su išilginiu plyšiu; c – vidinis ištinis storas simetriškai su spirale pastatytas ekranas; d – vidinis iš dviejų lygiagrečių plokštelių sudarytas, simetriškai su spirale pastatytas ekranas; e – vidinis iš dviejų lygiagrečių plokštelių sudarytas, asimetriškai su spirale pastatytas ekranas

dažnių priklausomybių matavimo metodikos „CST“ MWS programa analogiškos [1–3] darbuose pateiktoms schemoms ir metodikoms.

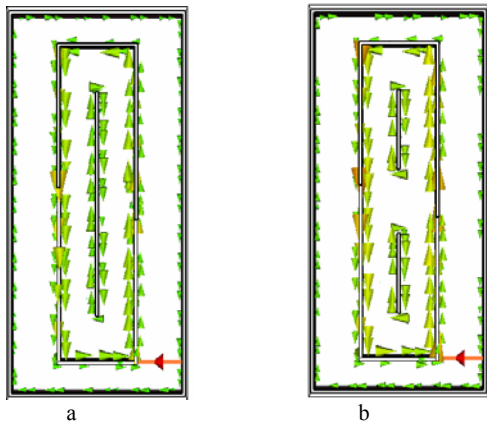
2 paveiksle, a ir b, sistemų fazinio vėlinimo laiko grafikai dažnių ruože nuo 0 iki 5 GHz pateikti 3 paveiksle.

Atlikti tyrimai parodė, kad siauri išilginiai plyšiai ploname vidiniame ekrane beveik nepakeičia fazinio vėlinimo trukmės dažninės priklausomybės. 3 paveiksle pateikti rezultatai gauti sistemoms, kurių vidiniai ekranai turi vieną arba du plačius (plyšio plotis sudaro iki 0,3 ekrano pločio) išilginius plyšius. Gautų rezultatų analizė rodo, kad plačių išilginių plyšių sudarymas yra tolygus vidinio ekrano susiaurinimui.



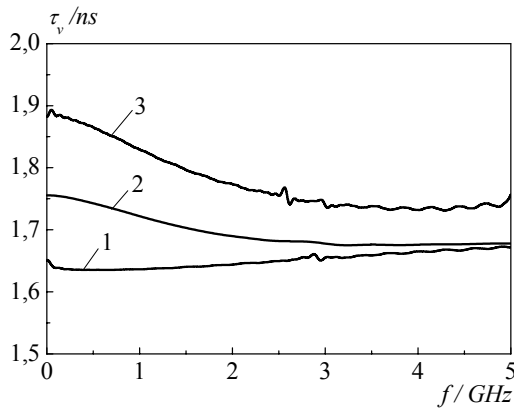
**3 pav.** Fazinio vėlinimo trukmės dažninės priklausomybės apskaičiuotos 2 paveiksle pateiktoms spiralinėms sistemoms: 1 – a variantas, 2 – b variantas, 3 – vidinis ekranas analogiškas b variantui, bet turi du plyšius

Atlikti elektromagnetinio lauko ir paviršinių srovių pasiskirstymo sistemos skerspjūvyje tyrimai parodė, kad žemųjų dažnių ruože išilginiai plyšiai ploname vidiniame ekrane praktiškai neturi įtakos elektromagnetinio lauko konfigūracijai sistemoje ir paviršinių srovių tekėjimo kryptiai vidiniame ekrane. 4 paveiksle pateiktos paviršinių srovių kryptys ir tankis spiralės ir ekranų laidininkų paviršiuose žemųjų dažnių ruože, kurios patvirtina anksčiau išsakytas mintis.



**4 pav.** Paviršinio srovės tankio pasiskirstymas spiralinės sistemos skerspjūvyje, kai dažnis  $f = 100$  MHz: a – sistemoje su vidiniu išsiniu ekranu; b – sistemoje su vidiniu ekranu, turinčiu išilginį plyšį

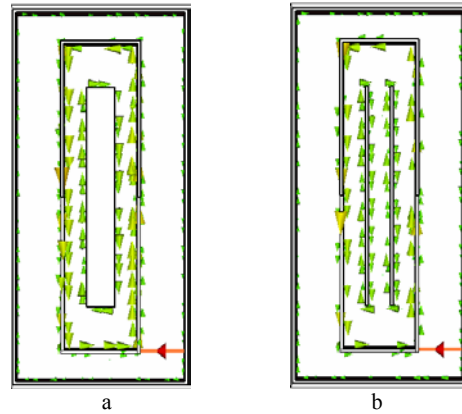
2 paveiksle, c, d ir e, parodytų sistemų fazinio vėlinimo laiko dažnių priklausomybių grafikai žemųjų dažnių ruože pateikti 5 paveiksle. Iš pateiktų duomenų matome, kad iš dviejų lygiagrečių plokštelių sudaryti vidiniai ekranai pasižymi anizotropinėmis savybėmis, dėl to padidėja sistemos fazinio vėlinimo laikas žemųjų dažnių ruože (2-oji ir 3-ioji kreivės 5 pav.). Didžiausią įtaką fazinio vėlinimo laikui žemųjų dažnių ruože turi asimetriškai spiralės atžvilgiu pastatytas vidinis anizotropinis ekranas (3-ioji kreivė 5 pav.).



**5 pav.** Fazinio vėlinimo trukmės dažninės priklausomybės apskaičiuotos 2 paveiksle pateiktoms spiralinėms sistemoms: 1 – c variantas, 2 – d variantas, 3 – e variantas

6 paveiksle pateikti paviršinių srovių pasiskirstymo sistemos skerspjūvyje tyrimo rezultatai. Iš šio paveikslo matyti, kad iš dviejų lygiagrečių plokštelių sudarytame vidiniame ekrane, paviršinių srovių sukurti magnetiniai laukai sumuojasi. Tai lemia didesnę vidinio ekrano induktivumą. Tuo galima paaiškinti sistemos lėtinimo koeficiento padidėjimą žemųjų dažnių ruože.

Asimetriškai pastatytas iš dviejų lygiagrečių plokštelių sudarytas vidinis ekranas padidina sistemos lėtinimo koeficientą žemųjų ir vidurinių dažnių ruože (5 pav., 3-ioji kreivė). To priežastis yra išilgai spiralės vijos susidarę periodiniai netolygumai [6]. Tolesni periodinių netolygumų įtakos tyrimai parodė, kad jie riboja sistemos praleidžiamų dažnių juostą.

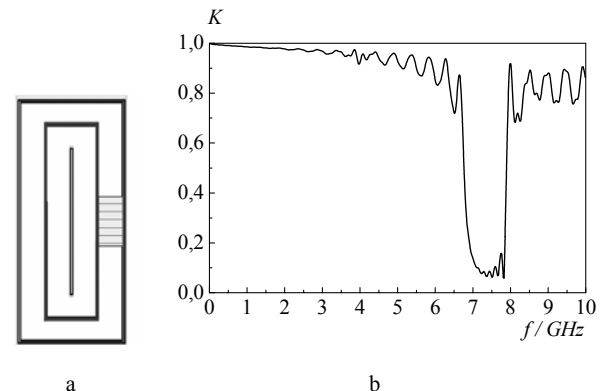


**6 pav.** Paviršinio srovės tankio pasiskirstymas spiralinės sistemos skerspjūvyje, kai dažnis  $f = 100$  MHz: a – sistemoje su vidiniu išsiniu (storu) ekranu; b – sistemoje su vidiniu ekranu, sudarytu iš dviejų lygiagrečių plokštelių

### Periodinių netolygumų įtakos tyrimas

Paprastai visoms spiralinėms lėtinimo sistemoms būdingi periodiniai netolygumai, kadangi spiralei tvirtinti naudojami specialūs dielektriniai laikikliai. [6] darbe parodyta, kad nevienalytė spiralinė sistema įgyja užtvarinio filtro savybių, kai, didėjant dažniui, fazės kampas  $\theta$  tarp gretimų spiralės vijų įtampų ar srovių artėja prie  $\pi$ . Norint padidinti sistemos praleidžiamųjų dažnių juostą beveik du kartus, siūloma kiekvieną spiralės viją tvirtinti prie dviejų dielektrinių laikiklių.

7 paveiksle pateikta spiralinė lėtinimo sistema su vienu dielektriniu spiralės laikikliu ir šios sistemos dažninė amplitudės charakteristika (DACH), apskaičiuota „CST“ MWS programa. Gauti skaičiavimo rezultatai visiškai patvirtino [6] darbo išvadas. Tuo pačiu metu paaiškėjo, kad



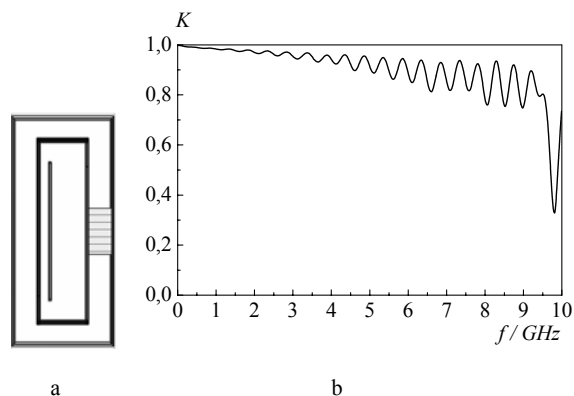
**7 pav.** Spiralinė lėtinimo sistema su keraminiu laikikliu (a) ir jos DACH (b)

sistemos praleidžiamų dažnių juostą galima išplėsti gerokai paprasčiau, negu tai siūlo [6] darbo autoriai. 8 paveiksle yra pateiktas toks sprendimas ir gauti jo tyrimo rezultatai. Čia tarp spiralės vijų padidėjimą dešinėje spiralės pusėje, kuris atsiranda dėl dielektrinio laikiklio, kompensuoja prie kairiosios spiralės pusės vijų priartintas vidinis ekranas. Vietoje vieno netolygumo išilgai spiralės vijos atsiranda du. Netolygumų periodas išilgai vijos

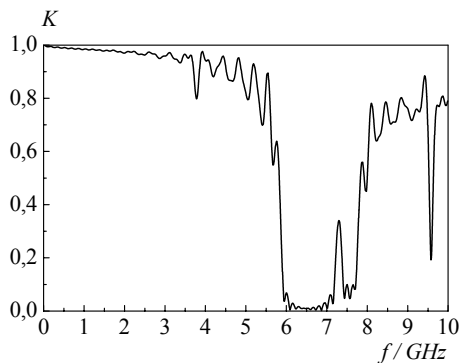
sumažėja, o užtvarinė juosta nukeliama į aukštesniųjų dažnių sritį (8 pav., b).

Šiame darbe buvo ištirta dielektrinių laikiklių įtaka spiralinės sistemos charakteristikoms. Atliktas tyrimas parodė, kad dielektriniai laikikliai, kurių santykinė dielektrinė skvarba  $\epsilon=9$  ir didesnė, gerokai apriboja sistemos praleidžiamų dažnių juostą. Spiralinės sistemos su ištisiniu dielektriniu laikikliu, kurio  $\epsilon=9$ , DACH parodyta 9 paveiksle.

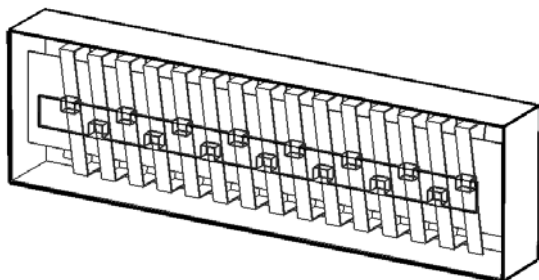
Žinomas patentas [7] kuriame pasiūlyta ištisinius keraminius laikiklius pakeisti dviejų eilių šukų pavidalo laikikliais, kuriais gretimos spirales vijos tvirtinamos prie skirtingų eilių laikiklių (10 pav.). Šios sistemos tyrimo rezultatai pateikti 11 paveiksle. Jie patvirtina dvieilių dielektrinių šukų panaudojimo efektyvumą.



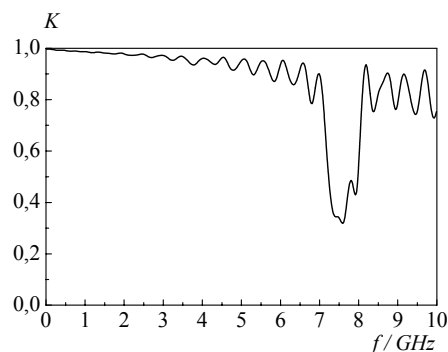
8 pav. Spiralinė lėtinimo sistema su keraminiu laikikliu ir asimetriškai pastatytu vidiniu ekranu (a) ir jos DACH (b)



9 pav. Spiralinės sistemos su ištisiniu keraminiu laikikliu DACH



10 pav. Spiralė su dviejų eilių šukų laikikliais



11 pav. Spiralinės sistemos su dvieiliu keraminių šukų laikikliu DACH

## Išvados

1. Atlikti tyrimai parodė akivaizdžius „CST“ MWS programų paketo privalumus, palyginti su „Microwave Office“ programų paketu: keliolika kartų trumpesnė skaičiavimo trukmė, paketas pritaikytas erdvinėms struktūroms modeliuoti, todėl įvertina atskirų konstrukcijos elementų tarpusavio sujungimus. Gauti tyrimo rezultatai gerai sutapo su žinomų autorių, šios srities specialistų teorinių tyrimų rezultatais ir tai patvirtino šio paketo panaudojimo lėtinimo sistemoms projektuoti naudą.
2. Tyrimas parodė, kad ploni vidiniai ekranai su išilginiais plyšiais anizotropinėmis savybėmis nepasižymi. Dėl išilginių plyšių rezonansų sistemoje aptikti nepavyko.
3. Spiralinėse lėtinimo sistemose dielektrinių laikiklių ribojamą praleidžiamų dažnių juostos plotį galima padidinti beveik du kartus vidiniais arba išoriniais ekranais. Tam tikslui vidinį arba išorinį ekraną reikia priartinti prie dielektriniais laikikliais nesutvirtintos spiralės plokščiosios dalies.

## Literatūra

1. Skudutis J., Daškevičius V., Garšva E. Microwave Office programų paketo taikymo lėtinimo sistemoms tirti patirtis // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2004. – Nr.2(51). – P. 68–73.
2. Daškevičius V., Skudutis J. Spiralinės vėlinimo sistemos savybių tyrimas Microwave Office 2000 paketu // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2000. – Nr.2(25). – P. 30–33.
3. Skudutis J., Daškevičius V. Ekranų įtakos spiralinės sistemos savybėms tyrimas // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2003. – Nr.6(48). – P. 22–27.
4. Potapov J. CST Microwave Studio 5.0 // EDA Expert #8 CHIP NEWS 7, – 2004. – P. 36–41.
5. Штарас С. С. и др. Широкополосные тракты осциллографических электронно-лучевых трубок бегущей волны. – Вильнюс: Техника, 1993. – 359 с.
6. Štaras S., Burokas T. Nevienalytės spiralinės sistemos savybės // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2003. – Nr.1(43). – P. 17–20.
7. Вайнорис З. А., Скудутис Ю. А., Станкунас Й. Й., Чуплинскас А. А., Штарас С. С. Широкополосная отклоняющая система для электронно-лучевых трубок / Авторское свидетельство № 1114236.

**J. Skudutis, V. Daškevičius. Spiralinės lėtinimo sistemos savybių tyrimas programų paketu „MicroWave Studio“ // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2005. – Nr. 1(65). – P. 38–42**

Analizuojamos paketo „MicroWave Studio“ (MWS) taikymo spiralinių lėtinimo sistemų savybėms tirti galimybės. MWS – tai šiuolaikiška trimačio elektromagnetinio modeliavimo sistema. Programa taiko baigtinių integralų metodą (FIT), kuris, įvertindamas energijos tvermės dėsnį, iš pradžių aprašo erdvinio tinklelio Maksvelo lygtis, o po to formuoja specifines diferencialines lygtis (banginę arba Puasono). Metodas gali būti įgyvendintas dažnių arba laiko srityse. Šia programa ištirtos plokščios spiralinės sistemos su įvairių tipų vidiniais ekranais: plonais ir storais ištisiniais, anizotropiniais su išilginiais plyšiais ir sudarytais iš dviejų lygiagrečių plokštelių, su simetriškai ir asimetriškai išdėstytais spiralės viduje. Gauti rezultatai patvirtino šio ir kitų darbų autorių anksčiau literatūroje skelbtus teorinių ir eksperimentinių tyrimų rezultatus. Pažymėtina, kad paketas leidžia išsiaiškinti sistemoje vykstančius fizikinius procesus. Kartu su pagrindinėmis sistemos charakteristikomis galima gauti elektrinio ir magnetinio laukų bei paviršinių srovių pasiskirstymą sistemos elektroduose. MWS taikymas leido atskleisti anksčiau teorinių tyrimų metu neaptiktas nagrinėjamų sistemų savybes. Išilginiai plyšiai ploname vidiniame spiralės ekrane (kurio storis 5 ir daugiau karto mažesnis už plotį) sistemos charakteristikų nepakeičia, kadangi tokio ekrano anizotropinės savybės yra labai neryškios. Tyrimai patvirtino, kad rezonansų priežastis spiralinėje sistemoje su vidiniu ir išoriniu ekranais yra bendraašės linijos atkarpa, kurią sudaro sistemos galuose trumpai sujungti vidinis ir išorinis ekranai. Papildomų rezonansų sistemoje dėl plyšių vidiniame ekrane aptikti nepavyko. Ištirta sistema su dielektriniais laikikliais ir parodyta, kad tokia sistema pasižymi užtvarinio filtro savybėmis. Parodyta, kad praplėsti tokios sistemos praleidžiamųjų dažnių juostą beveik du kartus galima asimetriškai išdėstant spiralės atžvilgiu vidinį arba išorinį ekranus. Laikiklių įtaką galima gerokai sumažinti (susiaurinti užtvarinę juostą ir perkelti ją į aukštesnių dažnių sritį) naudojant dvieiles dielektrines šukas.

Il. 11, bibl. 7 (lietuvių kalba; santraukos lietuvių, anglų ir rusų k.).

**J. Skudutis, V. Daškevičius. Investigation of delay system properties by software package “MicroWave Studio” // Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technologija, 2005. – No.1(65). – P. 38–42.**

Possibilities of the MicroWave Studio (MWS) package application to the investigation of properties of helical delay systems are analyzed. MWS is a modern system of three-dimensional electromagnetic modeling. The program uses the finite integral technique (FIT), which, evaluating the energy conservation law, at first describes the Maxwell equations on a spatial grid and then forms specific differential equations (wave and Poisson equations). The method can be realized in the frequency and time ranges. Flat helical systems with different type internal shields: thin and thick continuous, anisotropic with longitudinal slots and formed of two parallel wafers, symmetrically and asymmetrically placed inside the helix – were analyzed using this program. The obtained results confirmed the theoretical and experimental investigation results of authors of this work and other earlier published works. It should be noted that the package enables determination of physical processes occurring in the system. Alongside with main characteristics of the system, it is possible to obtain the distribution of electric and magnetic fields and surface currents in the system electrodes. The MWS application made it possible to reveal the investigated system properties earlier not detected by theoretical research. The introduction of longitudinal slots into the thin internal helix shield (the thickness of which is five and more times less than the width) does not change the system characteristics because the anisotropic properties of such a shield are very slightly expressed. The investigations confirmed that the cause of resonances in the helical system with the internal and external shield was the coaxial line segment, which is formed of short-connected internal and external shields at the systems ends. Additional resonances in the system due to slots on the internal shield were not detected. The system with dielectric holders was investigated, and it was determined that such a system is distinguished by the rejection filter properties. It has been shown that it is possible to extend the frequency pass-band of such a system almost two times by placing the internal and external shields asymmetrical about the helix. It is possible to considerably reduce the influence of holders (to narrow down the rejection band and to shift it to the higher frequency range) by using the two-row dielectric holder.

III. 11, bibl. 7 (in Lithuanian; summary in Lithuanian, English and Russian).

**Ю. Скудутис, В. Дашкевичюс. Исследование свойств замедляющей системы с применением пакета „MicroWave Studio” // Электроника и электротехника. – Каунас: Технология, 2005. – № 1(65). – С. 38–42.**

Анализируются возможности применения пакета „MicroWave Studio” (MWS) для исследования свойств спиральных замедляющих систем. MWS – это современная система трехмерного электромагнитного моделирования. Программа использует метод конечных интегралов, который, учитывая закон сохранения энергии, сначала описывает уравнения Максвелла на пространственной сетке, а затем формирует специфические дифференциальные уравнения (волновое или Пуассона). Метод может быть реализован в частотной или временной областях. С помощью этой программы исследованы плоские спиральные системы с различными типами внутренних экранов: тонкими и толстыми сплошными, анизотропными с продольными щелями и состоящими из двух параллельных пластин, расположенными внутри спирали симметрично и асимметрично. Полученные результаты подтвердили результаты теоретических и экспериментальных исследований, ранее опубликованные в литературе этими и другими авторами. Знаменательно, что пакет позволяет выяснить физические процессы, происходящие в системе. Наряду с основными характеристиками можно получить распределение электрического и магнитного полей в системе, а также поверхностных токов в электродах системы. Применение MWS позволило обнаружить свойства систем, не замеченные ранее в результате теоретических исследований. Введение продольных щелей в тонкий внутренний экран (толщина которого в 5 и более раз меньше ширины) характеристик системы не меняет, так как анизотропные свойства тонкого экрана очень слабо выражены. Исследования подтвердили, что причина резонансов в спиральной системе с внешним и внутренним экранами – отрезок коаксиальной линии, которую составляют закороченные на концах системы внутренний и внешний экраны. Дополнительных резонансов из-за щелей во внутреннем экране обнаружить не удалось. Исследована система с диэлектрическими держателями, и показано, что такая система обладает свойствами заградительного фильтра. Показано, что полосу пропускаемых частот такой системы можно расширить почти в два раза, располагая асимметрично спирали внутренний или внешний экраны. Влияние держателей можно значительно уменьшить (сузив заградительную полосу и перенеся ее на более высокие частоты), используя двухрядную диэлектрическую гребенку.

Ил. 11, библи. 7 (на литовском языке; рефераты на литовском, английском и русском яз.).