



Tomas BUOKAS

**MODELING AND SIMULATION
OF THE SUPER-WIDE-BAND SLOW-WAVE
AND DEFLECTION STRUCTURES**

**Summary of Doctoral Dissertation
Technological Sciences, Electrical Engineering and Electronics
(01T)**

1270

Tomas BUROKAS

**MODELING AND SIMULATION
OF THE SUPER-WIDE-BAND SLOW-WAVE
AND DEFLECTION STRUCTURES**

Summary of Doctoral Dissertation
Technological Sciences, Electrical Engineering and Electronics
(01T)

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2002–2006

Scientific Supervisor

Prof Dr Habil Stanislovas ŠTARAS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Electrical Engineering and Electronics – 01T)

The dissertation is being defended at the Council of Scientific Field of Electrical Engineering and Electronics at Vilnius Gediminas Technical University:

Chairman

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

Members:

Prof Dr Habil Raimundas KIRVAITIS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Electrical Engineering and Electronics – 01T)

Prof Dr Habil Romualdas NAVICKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Electrical Engineering and Electronics – 01T)

Prof Dr Habil Stanislavas SAKALAUSKAS (Vilnius University, Technological Sciences, Electrical Engineering and Electronics – 01T)

Prof Dr Habil Stasys Vygantas AUGUTIS (Kaunas University of Technology, Technological Sciences, Measurement Engineering – 10T)

Opponents:

Prof Dr Habil Jonas STANKŪNAS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Electrical Engineering and Electronics – 01T)

Dr Mindaugas DAGYS (Semiconductor Physics Institute, Electrical Engineering and Electronics – 01T)

The dissertation will be defended at the public meeting of the Council of Scientific Field of Electrical Engineering and Electronics in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at 1 p.m. on 23 June 2006.

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius-40, Lithuania

Tel.: +370 5 274 49 52; +370 5 274 49 56; fax +370 5 270 01 12;

e-mail doktor@adm.vtu.lt

The summary of the doctoral dissertation was distributed on 23 May 2006.

A copy of the doctoral dissertation is available for review at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, Vilnius, Lithuania).

Tomas BUROKAS

**SUPERPLAČIAJUOSČIŲ LĒTINIMO IR KREIPIMO
SISTEMŲ MODELIAVIMAS IR ANALIZĒ**

Daktaro disertacijos santrauka
Technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija (01T)

Disertacija rengta 2002–2006 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete

Mokslinis vadovas

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

Disertacija ginama Vilniaus Gedimino technikos universiteto Elektros ir elektronikos inžinerijos mokslo krypties taryboje:

Pirmininkas

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

Nariai:

prof. habil. dr. Raimundas KIRVAITIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T),

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

prof. habil. dr. Stanislavas SAKALAUSKAS (Vilniaus universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T),

prof. habil. dr. Stasys Vygantas AUGUTIS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, matavimų inžinerija – 10T).

Oponentai:

prof. habil. dr. Jonas STANKŪNAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T),

dr. Mindaugas DAGYS (Puslaidininkų fizikos institutas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T).

Disertacija bus ginama viešame Elektros ir elektronikos inžinerijos mokslo krypties tarybos posėdyje 2006 m. birželio 23 d. 13 val. Vilniaus Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius-40, Lietuva

Tel.: +370 5 274 49 52, +370 5 274 49 56; faksas +370 5 270 01 12;

el. paštas doktor@adm.vtu.lt

Disertacijos santrauka išsiuntinėta 2006 m. gegužės 23 d.

Disertacija galima peržiūrėti Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, Vilnius).

VGTU leidyklos „Technika“ 1270 mokslo literatūros knyga

1. General Characteristic of the Dissertation

Topicality of the problem. Super-wide-band slow-wave structures are microwave devices where velocity of electromagnetic wave is sufficiently less than velocity of the light and constant in wide frequency range.

The super-wide-band slow-wave structures are widely applied in nowadays electronic and radio systems. They are used in high power traveling-wave microwave amplifiers, generators, analog to digital converters, in communication techniques as antennas. Recently they are applied for deflection of proton beam in Spallation Neutron Source projects. Slow-wave and deflection structures (delay and deflection systems) are used in super-wide-band oscilloscope cathode-ray tubes for deflection of electron beam as well. Slow-wave and deflection structure and cathode ray tube are used in measurement equipment of pulse parameters and other equipment to test and measure high speed non-periodic signals. The electron beam is deflected by the transverse electric field component of the electromagnetic wave, stimulated by the test signal.

According to type of slow-wave structures, requirements for their parameters are formulated. It is important that the velocity of the traveling-wave must equal the velocity of the electron when slow-wave structure is used as deflection system in the oscilloscope cathode-ray tube. It is also important not to exceed allowed limitations of dispersion of the electromagnetic wave velocity and characteristic impedance, values of attenuation. It is necessary to decrease change of the transverse component of the electric field versus frequency and transverse coordinate of slow-wave structure as much as possible in the pass-band of oscilloscope cathode-ray tube.

Slow-wave structures are helical, serpentine and gutter type of different modifications. They can be symmetrical and non-symmetrical, homogeneous and non-homogeneous.

There are many methods of slow-wave structures analysis, algorithms and programs for evaluation of system characteristics.

Analytical and numerical methods can be applied for analysis of slow-wave structures. Analytical methods are electrodynamic and multi-conductor methods. Analytical electrodynamic method has limitations: electrodynamic model of the system can not evaluate width and thickness of the conductor. Also tedious work must be done for mathematical modeling and analytical expressions derivation using analytical methods.

Nowadays the development of technologies and increasing of operating speed of personal computers causes that numerical methods are applied for analysis of microwave systems more often. Mostly finite difference, finite element, moment, finite difference time domain methods are used. Software packages for design and analysis of electrodynamic systems (*Argus*, *HFSS*, *MAFIA*, *XFDTD*, *CST Microwave Studio*) facilitate analysis, but calculations are relatively slow and it is possible to reveal only general effects, related to properties of the structures, revelation of different effects is complicated.

Systematic analysis of slow-wave structures was started by group of scientists headed by prof. Z. Vainoris in Lithuania, in Kaunas Polytechnic Institute (now Vilnius Gediminas Technical University) in 1965. During three decades reliable theoretical essential was created. However there are questions that are necessary to solve to improve modeling and methodology of analysis of slow-wave structures. Evaluation of influence of the factors to the properties of the systems can be done more precise with improvement of analysis methods. For such achievement great opportunities give modern numerical methods and possibilities of modern techniques.

Aim and tasks of the work. The aim of this work is to investigate insufficiently analyzed variants of the electrodynamic super-wide-band slow-wave structures, create their models, improve methods of analysis, analyze properties of the systems and reveal potentiality of the traveling-wave cathode-ray tubes, slow-wave structures. In order to achieve the aim it is necessary:

1. To improve method for evaluation of non-linear distortions in the traveling-wave cathode-ray tubes and reveal possibilities of reduction of non-linear distortions.
2. To create models of the insufficiently analyzed variants of slow-wave structures and reveal properties of the slow-wave structures.
3. To reveal influence of periodical non-homogeneities on properties of slow-wave structures, simulate and reveal influence of transitions to properties of slow-wave structures and traveling-wave cathode-ray tubes.
4. To make investigation of potentiality of slow-wave structures and traveling-wave cathode-ray tubes and select variants of slow-wave structures that can guarantee wide band and high operating speed of the traveling-wave cathode-ray tubes.

Scientific novelty and practical value. Models of insufficiently simulated slow-wave structures were created and their properties were analyzed. According to analysis and modeling results, variants of systems were selected that can guarantee the wide pass-band and high operating speed of the traveling-wave cathode-ray tubes.

Using finite element method calculation of characteristic impedances of multi-conductor line was improved and realized using *Matlab PDE Tools* software package.

Methodology for calculation of pulse characteristics was suggested; calculation results and analysis were revealed. Influence of probe voltage step polarity, initial trajectory of electron beam, initial voltage shift and type of the system to configuration and rise time of pulse characteristic were revealed.

The model of quasi-symmetrical deflection system was created and the dispersion equation was derived. Using the model, the influence of the short-circuited turns on retardation factor, input impedance of the quasi-symmetrical system and attenuation of the propagating wave in the system was considered. Characteristics of retardation factor, input impedance and attenuation versus frequency were calculated.

The model of the twined helical deflection system was created and the dispersion equation was derived. Properties of the twined helical systems were revealed. Model of the twined helical system was improved after inner shield was inserted. Models of twined helical systems with inner shield were created, the dispersion equations were derived and their properties were revealed. Using the finite difference method, the electric field in the twined helical system was analyzed and compared with electric field of system that contains one helical.

Models of the systems, containing periodical non-homogeneities, caused by the change of the helical wire width and dielectric holders were considered in order to reveal the influence of the non-homogeneities on properties of slow-wave structures at high frequencies. The dispersion equations were derived and characteristics of retardation factor and input impedance versus frequency were calculated.

The super-wide-band electrical circuits, containing slow-wave structures, were considered in order to improve frequency and step responses of the circuits and electronic devices. The model of the circuit, containing elements, modeling the transitions between traveling-wave deflection systems and strip-lines, was proposed and the expressions for reflection coefficients and transfer functions were derived using the diagrams of multiple reflections. The calculated input impedance, amplitude frequency and step responses of the super-wide-band electrical circuits and traveling-wave tubes were presented and analyzed.

Models of the gutter-type helical and serpentine structures, containing periodical non-homogeneities, caused by the window for the electron beam were considered and their properties were revealed. Calculation results of retardation factor, input impedance versus frequency were presented. Using the finite element method the electric field in the gutter-type systems was analyzed.

Using software package *CST Microwave Studio* 3D models of the gutter-type helical systems were created. Calculation results of amplitude frequency characteristic, input impedance and delay time versus frequency were calculated.

Methodology of research. Principles of computer modeling were applied. Models of insufficiently analyzed slow-wave structures variants were created. The multi-conductor line method was used for analysis. The numerical finite difference and finite element methods were used to increase accuracy of calculations of potential and electric field distribution, characteristic impedance. The numerical methods also were applied for solving of the dispersion equation, for calculations of electron trajectory and traveling-wave cathode-ray tubes characteristics, for analysis of linear and non-linear distortions.

To supplement results, software package *CST Microwave Studio* was used.

Obtained results were summarized and compared with results of other authors.

Presented for defence:

1. Methods for analysis of deflecting electrical field, for evaluation of non-linear distortions in traveling-wave cathode-ray tubes, for calculation of step response of the traveling-wave cathode-ray tubes.

2. Methodology of analysis, models, the dispersion equations and analysis of results of quasi-symmetrical and twined helical slow-wave structures.
3. Models, the dispersion equations and analysis of results of non-homogeneous helical, serpentine, twined, quasi-symmetrical, and gutter type slow-wave structures.
4. Analysis of potentiality of the oscilloscope traveling-wave cathode-ray tubes and slow-wave structures.

The scope of the scientific work. The scientific work consists of the general characteristic of the dissertation, 6 chapters, conclusions, addenda, list of literature, list of publications. The total scope of the dissertation – 179 pages (created using *Microsoft Word 2002* text editor), 85 pictures, 3 tables, 15 addendum with total 55 pages, 182 literature sources, 17 publications.

2. The content of the dissertation

In chapter 1, designs of the slow-wave structures, analysis of deflection in systems and traveling-wave cathode-ray tubes, methods of analysis are reviewed. Tendencies and achievements are revealed. The aim and goals of this work are formulated at the end of the chapter 1.

In chapter 2, the influence of various factors on the dynamic characteristics of the oscilloscope traveling-wave cathode-ray tubes and their signal paths in order to find reserves for improving the dynamic characteristics, increasing operation speed and reducing linear distortions of signal form in the traveling-wave cathode-ray tubes was revised. Delay dispersion, attenuation, change of characteristic impedance, change of the deflecting electric field, the transit time of electrons and other factors limit the width of the pass-band and the rise time of the transient response. The rise time of the transient response of a tube usually is less than the rise time of the signal path. The delay distortion has the most negative influence on the dynamic properties of the tubes and their signal paths.

Also analysis of the electron beam deflection in the traveling-wave cathode-ray tubes for super-wide band high-speed electronic oscilloscopes is considered. At high frequency the electromagnetic field in a traveling-wave deflection system obtains the surface-type character. The zero space harmonic of the transverse electric field, causing deflection of the electron beam in the tube, becomes dependent on frequency and the transverse coordinate. This causes linear and non-linear distortions of the image on the screen of the tube. Besides that the quality of the focusing of the beam decreases. The shielded helical and serpentine (gutter-type) and symmetrical traveling-wave deflection systems are recommended in order to reduce the non-linear distortions and improve the focusing quality of the beam.

Beside that the methodology of calculation of the step responses at strong deflection voltages is proposed and calculated transient responses of the tubes are considered in order to estimate distortions of step voltages and to reveal opportunities to improve the step responses.

Fig 1 illustrates the simplified algorithm that can be applied for calculation of

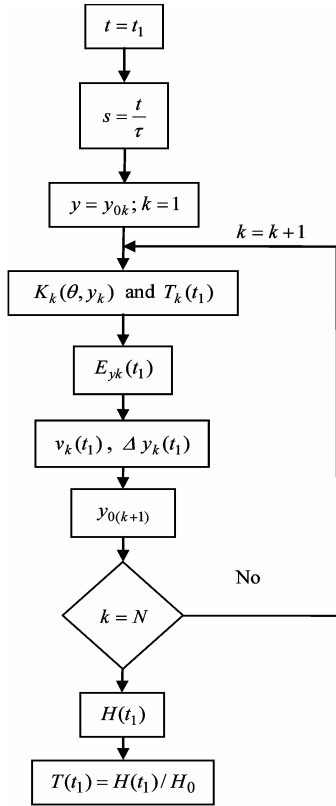


Fig 1. The simplified algorithm for calculation of the value of the transient response

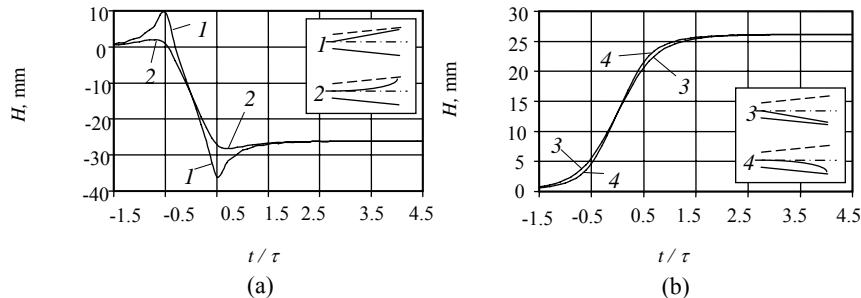


Fig 2. Transient responses of the tube with the asymmetrical deflecting system at (a) negative and (b) positive probing steps and $w_1 = 1$ mm, $w_2 = 3$ mm, $y_{01} = 0.5 w_1$, $L = 1.5$ mm, $N = 10$, $U_0 = 1.5$ kV, $l_s = 0.15$ m: 1, 2 – $y_{01} = 0.9 w_2$; 3, 4 – $y_{01} = 0.1 w_2$

the value of the transient response at $t = t_1$.

The calculation results of the transient responses of the tubes with the asymmetrical and symmetrical deflecting system at negative and positive probing steps are considered. Calculation results of transient responses of the tube with the asymmetrical deflecting are shown in Fig 2.

The transient response of the tube is dependent on the type of the deflection system, initial trajectory of the beam, bias voltage, polarity of the probing voltage step and its height. Frequency-dependent distortions are less in the symmetrical deflecting systems. In order to improve the form of the transient response and to reduce its rise time, it is necessary to reduce the transit time of the period of the system by electrons and the gap between the deflecting electrodes.

In chapter 3, properties of the quasi-symmetrical helical deflection system are considered. The system was developed for the super-wide-band traveling-wave tubes that can be used for measurements of momentary

voltages using compensation method. The system contains two helices and shields. One helix is used as the retardation electrode of the traveling-wave deflection system. Turns of the other helix are short-circuited. This helix can be used as the compensation voltage electrode.

The influence of the short-circuited turns on retardation factor, input impedance of the quasi-symmetrical system and attenuation of the propagating wave in the system is considered. The short-circuited turns cause increase of retardation factor and input impedance of the quasi-symmetrical system in the lower frequency range. The influence of the short-circuited turns on retardation factor and input impedance decreases with frequency because the electromagnetic field in the slow-wave structures has surface character and electromagnetic coupling between the helical electrode of the system and the short-circuited turns of the compensation electrode decreases with frequency.

It is shown that losses in the short-circuited turns cause attenuation of the traveling-wave. In order to reduce attenuation, it is necessary to increase conductivity of the short-circuited turns and to reduce coupling between the slow-wave and compensation electrodes.

In chapter 4, a helical traveling wave deflection system, containing helices intertwined in a bifilar fashion, is considered. Fragment of the twined helical system is shown in Fig 3. The model of the system is proposed (Fig 4). A segment of the shielded multi-conductor line is used in the model. The line contains two rows of conductors. Two conductors in a period of the line with interconnections at their ends allow to model coaxial helices with periodic change of widths of the conductors. Using the model, dispersion equation (1) and expressions for the input impedance (2), (3) of the system are derived. Dispersion equation is given by:

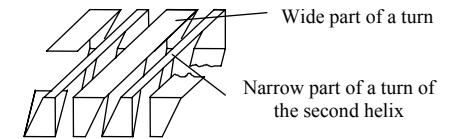


Fig 3. Fragment of the twined helical system

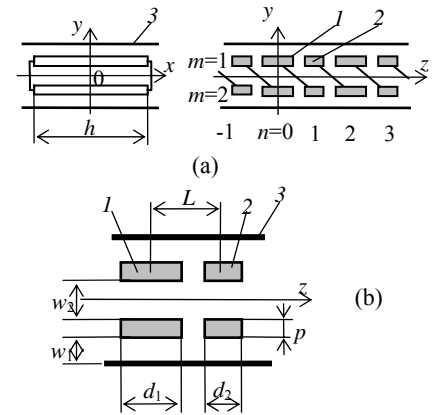


Fig 4. Model of the twined helical system: (a) and period of multi-conductor line (b): 1, 2 – conductors; 3 – shield

$$\begin{aligned} & \frac{Y_2(0, \pi + \theta) \sin \theta - [Y_1(\pi, \pi + \theta) + Y_2(\pi, \pi + \theta) \cos \theta] \tan^2(kh/2) \cot(\theta/2)}{Y_2(0, \theta) \sin \theta - [Y_1(\pi, \theta) - Y_2(\pi, \theta) \cos \theta] \tan^2(kh/2) \tan(\theta/2)} = \\ & = \frac{Y_1(0, \pi + \theta) - Y_2(0, \pi + \theta) \cos \theta - 2Y_2(\pi, \pi + \theta) \tan^2(kh/2) \cos(\theta/2)}{Y_1(0, \theta) + Y_2(0, \theta) \cos \theta - 2Y_2(\pi, \theta) \tan^2(kh/2) \sin^2(\theta/2)}. \end{aligned} \quad (1)$$

Input impedance if $n = 0$:

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

and if $n = 1$:

$$Z_1 = \frac{U_{11}(0) - U_{21}(0)}{I_{11}(0) + I_{21}(0)} = \frac{\tan(kh/2) \cot(\theta/2) + S \tan(kh/2) \tan(\theta/2)}{Y_2(0, \pi + \theta) - SY_2(0, \theta)}. \quad (3)$$

Value S in formulas (2) and (3) is given by:

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

Calculations of retardation factor and input impedances versus frequency are made. Calculated characteristics are shown in Fig 5.

The pass-band of a system, containing twined helices with periodical change of the width of conductors, is limited to $1/4t_D$, where t_D is the delay time of electromagnetic wave along the homogeneous section of a helical wire. Increase of the periodic deviation of the helical wire width causes increase of the retardation factor and more intensive change of the input impedance of the twinned helical system.

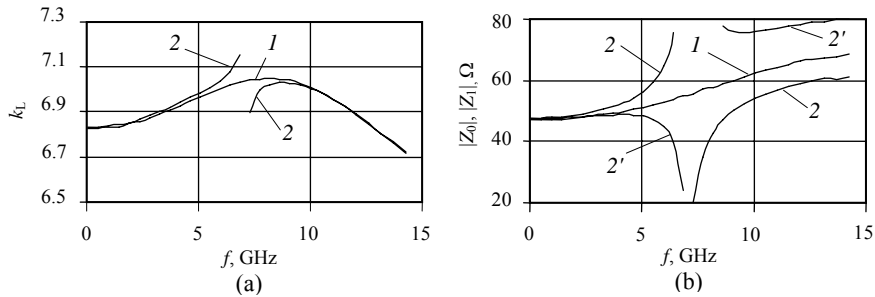


Fig 5. Retardation factor (a) and input impedances (b) versus frequency of the twined helical, when $h=10$, $L=1.5$, $p=0.1$, $w_1=0.3$, $w_2=0.7$: 1 - $d_1=d_2=1$; 2 - $d_1=1.1$, $d_2=0.9$ mm

Also electrical field in the helical traveling-wave deflection systems is considered. The finite difference method is used to find distributions of potential and electrical field in the systems. In order to evaluate the action of the traveling-wave on the electronic beam, amplitudes of zero space harmonics of transverse and longitudinal components are considered. Examples of calculated characteristics are presented and properties of the helical deflection systems containing twined helices, are discussed. According to analysis, the strength of the deflecting field in the system, containing twined helices, strongly depends on the ratio of the widths of the neighbor helical wires. It is impossible to obtain high sensitivity of the traveling-wave cathode-ray tube using the system with twined helices. The longitudinal component of the electrical field in the twined helical system has low level of the zero space harmonic only when ratio of the widths of the neighbor helical wires equals 1.

To improve characteristics of the twined helical system, use of the inner shield inside of the helices is suggested. Analysis of the helical systems with constant and periodically changing widths of the conductors is presented. Models using multi-conductor line method are created. It is shown that retardation factor and input impedance of the system, containing changeable width of the conductors and the inner shield, change with frequency less than in the same system without the inner shield.

In chapter 5, a helical system, containing periodical non-homogeneities, caused by change of the helical wire width and other reasons, is considered in order to reveal the influence of the non-homogeneities on properties of helical delay lines and other slow-wave structures at high frequencies. The proposed model of the system is a segment of the shielded non-homogeneous multi-conductor line, containing one row of conductors and one conductor in the period of the structure. Using the model, the dispersion equation and the expression for the input impedance of the system are derived. They are used for calculations of retardation factor and input impedance versus frequency. Examples of calculated characteristics are presented and properties of the non-homogeneous helical systems are revealed. When frequency increases and the phase difference angle θ between the voltages or currents on the neighbor helical wires approaches π , the non-homogeneous slow-wave structure obtains properties of the rejection filter. The width of the stop-band depends on the ratio of characteristic impedances of the homogeneous sections of the helical wire.

The helical and serpentine structures, containing periodical non-homogeneities, caused by dielectric holders, are considered. The proposed models of the systems consist of segments of the shielded multi-conductor line, containing one row of conductors and one conductor in the period of the structure. Capacitive non-homogeneities are modeled by lumped capacitances. The dispersion equations and the expressions for the input impedance of the systems are derived. It is shown, that periodical non-homogeneities decrease the width of the pass-band of the helical and serpentine systems. The non-homogeneous systems obtain properties of the rejection filter in the high frequency region. The non-homogeneous helical

system obtains properties of the rejection filter, when the phase difference angle θ between the voltages or currents on the neighbor helical wires approaches π . The width of the stop-band depends on the ratio of the capacitances, modeling non-homogeneities, and the distance between them. It is important that there is possibility to decrease and to move the stop-band to almost twice higher frequency range when mentioned ratio becomes 1. In the case of the traveling-wave deflection systems, the stop-band is higher than the upper limit of the pass-band of the traveling-wave cathode-ray tube. On the other hand, designers of the super-wide-band traveling-wave deflection systems and traveling-wave cathode-ray tubes must take into account revealed influence of the periodic non-homogeneities on the properties of the slow-wave structures. It is possible to improve properties of the deflection systems using two or more uniform holders with the same distance between them instead of one. The influence of the periodical capacitive non-homogeneities on the properties of the serpentine systems is different. The first stop-band appears in the lower frequency range (when $\theta \cong \pi/2$), and it is impossible to avoid it by decreasing the distance between the capacitances, modeling holders. The position of the stop-band depends on the period of the serpentine conductor.

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, modeling the transitions between traveling-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 traveling-wave tubes are presented and analyzed. 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 traveling-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 traveling-wave cathode-ray tube. The traveling-wave deflection systems containing the shields between the wires of the helical or serpentine deflecting electrodes are recommended for the super-wide-band traveling-wave tubes. The shields decrease the coupling between the wires, and the characteristic impedance and the phase velocity in the traveling-wave deflection system become less dependent on frequency.

In chapter 6, the gutter-type helical and serpentine traveling-wave deflecting systems (Fig 6), containing periodical non-homogeneities, caused by the special gap for the electron beam, are considered in order to reveal the influence of the non-homogeneities on properties of the systems. The multi-conductor lines method is used for analysis of the systems. The models of the systems, containing

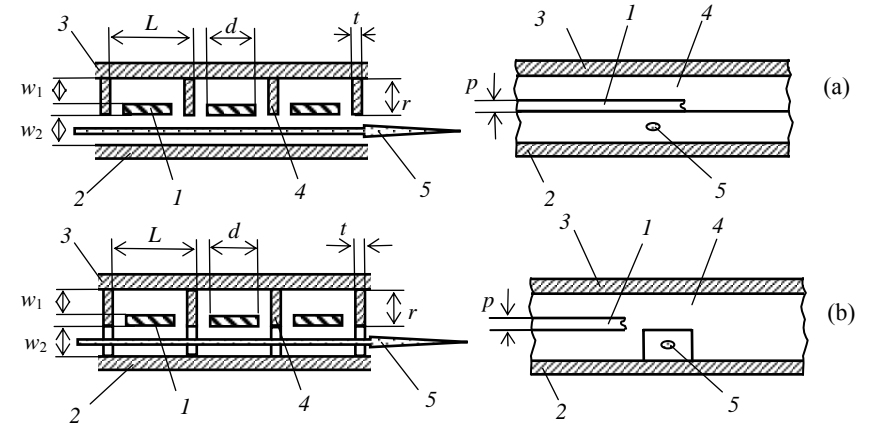


Fig 6. Fragments of gutter type deflection systems: 1 – helical or serpentine wire; 2, 3 – shields; 4 – shielding wall; 5 – electron beam

segments of the shielded multi-conductor lines, containing one row of conductors, are used. The dispersion equations and the expressions for the input impedance of the systems are considered. Examples of the calculated characteristics (retardation factor and input impedance versus frequency) are presented (Fig 7) and properties of the non-homogeneous gutter-type systems are revealed. The input impedance of the non-homogeneous gutter-type helical system changes with frequency less than the input impedance of the homogeneous gutter-type helical system. The dispersion of the retardation in the non-homogeneous gutter-type serpentine system is less than in the homogeneous gutter-type serpentine system. When frequency increases and the phase difference angle θ between the voltages or currents on the neighbor helical or serpentine wires approaches π , the non-homogeneous slow-wave structure obtains properties of the rejection filter. The width of the stop-band is less and the characteristics of the non-homogeneous gutter-type systems become better when the dimensions of the special gap for the electron beam are less.

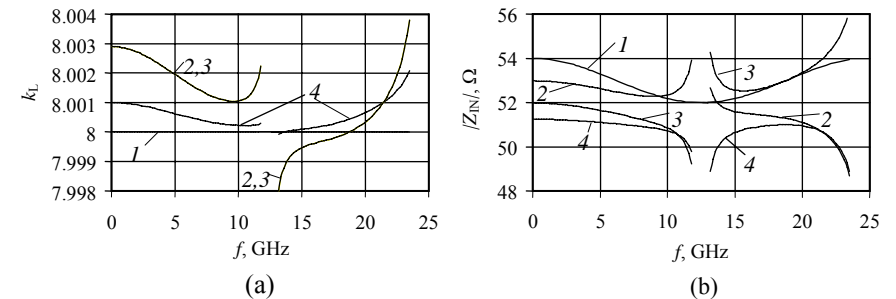


Fig 7. Retardation factor (a) and input impedance (b) versus frequency of the helical gutter-type deflection system, when, $h = 12$ mm, $L = 1.5$ mm, $l = 0.7$ mm, $p = 0.2$ mm, $t = 0.2$ mm, $r = 0.6$ mm, $w_1 = 0.4$ mm, $w_2 = 0.8$ mm: 1 – $a = 12$ mm; 2 – $a = 8$ mm; 3 – $a = 4$ mm; 4 – $a = 1$ mm

Besides that, the structure of the deflecting electric field is considered. The strength of the deflecting field in the gutter-type systems changes with frequency less than in the helical and serpentine systems without the shields between the neighbor wires. According to simulation of dynamic characteristics of the traveling-wave cathode-ray tubes, using the gutter-type systems, it is possible to avoid distortions, caused by delay dispersion and input impedance change versus frequency. The dimensions of the gap for electron beam in the non-homogeneous gutter-type systems must be minimal.

Application of commercial software packages *CST Microwave Studio* for analysis of the slow-wave structures is considered. The amplitude-frequency responses, calculated by *CST Microwave Studio* versus frequency are presented.

Amplitude-frequency response oscillations are caused by reflections, increasing with change of the system characteristic impedance – the characteristic impedance decreases with frequency. Relatively great non-uniformities of the responses are related to the resonant effects in the line, formed by the internal and external shields. When internal and external shields are short-circuited (when non-homogeneous gutter-type helical system is used) we can avoid resonant effects when phase angle θ is less than π .

3. General Conclusions and Recommendations

1. Methodology for evaluation of influence of non-linear distortions on properties of the traveling-wave cathode-ray tubes was improved and possibilities to decrease non-linear distortions were revealed. Non-linear distortions of signal image on the screen and the quality of the focusing of the electron beam can be decreased if symmetrical or gutter type deflection systems are used.
2. Models of insufficiently analyzed variants of slow-wave structures are created and their properties are revealed.
 - 2.1. Loss in short-circuited wires causes change of retardation factor and input impedance versus frequency of quasi-symmetrical system in the low frequency range and increase of attenuation in quasi-symmetrical system. Influence of the short-circuited wires as greater as resistance of wire greater and electromagnetic coupling between short-circuited wires and helical are greater.
 - 2.2. Influence of the short-circuited wires on properties of quasi-symmetrical system is not very great, but can respond to assessment of traveling-wave cathode-ray tubes.
 - 2.3. The pass-band of a system, containing twined helices with periodical change of the width of conductors, is limited to $1/4t_D$, where t_D is the delay time in the period of a helical wire. Decrease of the periodic deviation of the helical wire width causes decrease of the retardation factor and less intensive change of the input impedance of the twinned helical system.
 - 2.4. The strength of the deflecting field in the system, containing twined helices, strongly depends on the ratio of the widths of the neighbor helical wires.
 - 2.5. It is possible to improve properties of twined helical system using inner shield.
 - 2.6. Input impedance of non-homogeneous gutter-type helical system with window

for electron beam changes with frequency less than input impedance of homogeneous gutter-type helical system. Retardation factor of non-homogeneous gutter-type serpentine system changes with frequency less than retardation factor of homogeneous gutter-type serpentine system.

2.7. The strength of the deflecting electric field in the gutter-type systems changes with frequency less than in the helical and serpentine systems without the shields between the neighbor wires.

2.8. Amplitude-frequency response oscillations are caused by reflections, increasing with change of the system characteristic impedance – the characteristic impedance decreases with frequency. Relatively great non-uniformities of the responses are related to the resonant effects in the line, formed by the internal and external shields. When internal and external shields are short-circuited (when non-homogeneous gutter-type helical system is used) we can avoid resonant effects when phase angle θ is less than π .

3. Influence of periodical non-homogeneities to properties of slow-wave structures is revealed, influence of transitions to properties of slow-wave structures and traveling-wave cathode-ray tubes is simulated and revealed.

3.1. The non-homogeneous helical, serpentine and gutter-type systems obtain properties of the rejection filter, when the phase difference angle θ between the voltages or currents on the neighbor helical wires approaches π .

3.2. The width of the stop-band of the non-homogeneous helical system depends on the ratio of characteristic impedances of the homogeneous sections of the helical wire.

3.3. The width of the stop-band depends on the ratio of the capacitances, modeling non-homogeneities, and the distance between them. It is important that there is possibility to decrease and to move the stop-band to almost twice higher frequency range when mentioned ratios become 1. Period of the non-homogeneities determines location of the stop-band. It is possible to improve properties of the deflection systems using two or more uniform holders with the same distance between them instead of one.

3.4. The dimensions of the gap for electron beam in the non-homogeneous gutter-type systems must be minimal.

3.5. 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. It is possible to decrease reflections in the system if characteristic impedance of the transitions is the same as characteristic impedance of the signal path in the low frequency range and correct length of transitions is selected. Then amplitude frequency characteristic can be improved even if characteristic impedance of the deflection system changes with increasing of frequency few times.

4. Investigation of potentiality of slow-wave structures and traveling-wave cathode-ray tubes were made and variants of slow-wave structures that can the guarantee wide band and high operating speed of traveling-wave cathode-ray tubes were selected.

- 4.1. The shields between the wires of the helical or serpentine deflecting electrodes are recommended for the super-wide-band traveling-wave tubes in order to decrease change of velocity of electromagnetic wave, change of characteristic impedance of the slow-wave structures, non-linear distortions of the signal image on the screen.
- 4.2. The non-homogeneous gutter-type helical and serpentine traveling-wave deflecting systems with special gap for the electron beam are recommended in order to improve dispersive characteristics of the cathode-ray tubes and their signal paths.
- 4.3. According to modeling results, the pass-band of the traveling-wave cathode-ray tubes can be increased to 12 GHz.

Published works on the topic of the dissertation

In the acknowledged editions:

1. Štaras, S.; Burokas, T. Simulation and Properties of Transitions to Traveling-Wave Deflection Systems. *IEEE Transactions on Electron Devices*, ISSN 0018-9383. July 2004, Vol 51, No 7, p. 1049–1052.
2. Štaras, S.; Burokas, T. Model, Analysis and Properties of the Twined Helical Structure. *Electronics and Electrical Engineering*, ISSN 1392-1215. Nr. 5(34). Kaunas: Technologija, 2001, p. 21–24.
3. Štaras, S.; Burokas, T. Electric Field in Helical Traveling-Wave Deflection Systems. *Electronics and Electrical Engineering*, ISSN 1392-1215. Nr. 2(37). Kaunas: Technologija, 2002, p. 55–59 (in Lithuanian).
4. Štaras, S.; Burokas, T. Simulation of the Twined Helical Deflecting System. In: Baltic Electronics Conference, BEC'2002: Conference Proceedings, 2002, p. 43–46.
5. Štaras, S.; Burokas, T. Properties of Non-Homogeneous Helical Systems. *Electronics and Electrical Engineering*, ISSN 1392-1215. Nr. 1(43). Kaunas: Technologija, 2003, p. 17–20 (in Lithuanian).
6. Štaras, S.; Burokas, T. Non-Linear Distortions in Traveling-Wave Deflection Systems. *Electronics and Electrical Engineering*, ISSN 1392-1215. Nr. 6(48). Kaunas: Technologija, 2003, p. 42–47 (in Lithuanian).
7. Štaras, S.; Burokas, T. Modelling and Improvement of the Traveling-Wave Systems and Their Transitions. *Electronics and Electrical Engineering*, ISSN 1392-1215. Nr. 1(50). Kaunas: Technologija, 2004, p. 9–15 (in Lithuanian).
8. Burokas, T.; Štaras, S. Properties of Helical and Serpentine Sloa-Wave Systems Containing Dielectric Holders. *Electronics and Electrical Engineering*, ISSN 1392-1215. Nr. 4(53). Kaunas: Technologija, 2004, p. 22–27 (in Lithuanian).
9. Štaras, S.; Burokas, T. Simulation and Properties of Non-homogeneous Helical Systems. In: Proceedings of the XIV International Conference on Electromagnetic Disturbances, 2004, p. 203–206.
10. Burokas, T.; Štaras, S. Simulation of the Twined Helical System Containing Inner Shield. In: International Scientific Conference UNITECH'04 Proceedings, Gabrovo, 2004, vol. I, p. 125–129.

11. Štaras, S.; Burokas, T. Opportunities for Improvement of Dynamic Characteristics of Traveling-Wave Cathode-Ray Tubes and Their Signal Paths. *Electronics and Electrical Engineering*, ISSN 1392-1215. Nr. 2(58). Kaunas: Technologija, 2005, p. 47–52 (in Lithuanian).
12. Burokas, T.; Štaras, S. Properties of the Non-Homogeneous Gutter-Type Systems. *Electronics and Electrical Engineering*, ISSN 1392-1215. Nr. 6(62). Kaunas: Technologija, 2005, p. 26–31 (in Lithuanian).
13. Burokas, T.; Štaras, S. Simulation of Traveling-Wave Deflecting Systems and Deflection in Traveling-Wave Cathode-Ray Tubes. In: Proceedings of the XV International Conference on Electromagnetic Disturbances, 2005, p. 99–104.
14. Burokas, T.; Daskevicius, V.; Skudutis, J.; Staras, S. Simulation of the Wide-Band Slow-Wave Structures using Numerical Methods. In: Proceedings of the International Conference on „Computer as a Tool“, EUROCON 2005, 2005, vol. I, p. 848–851.
15. Štaras, S.; Burokas, T. Model and Properties of the Quasi-Symmetrical Helical Deflection System. *Electronics and Electrical Engineering*, ISSN 1392-1215. Nr. 2(66). Kaunas: Technologija, 2006, p. 68–73 (in Lithuanian).

In the other editions

16. Burokas, T. Simulation of Twined Helical system. In: Proceedings of the IV Conference of Young Scientists „Lithuania without science – Lithuania without future“, 2000, p. 11–16.
17. Zemitan, A.; Burokas, T. Calculation of Characteristic Admittances Using Finite Element Method. In: Proceedings of the VI Conference of Young Scientists „Lithuania without science – Lithuania without future“, 2005, p. 56–65.

About the author

Tomas Burokas was born in Vilnius, on 26th of March 1978.

The first degree in Electronic and Electrical Engineering, Faculty of Electronics, Vilnius Gediminas Technical University, 2000. Master of Science in Electronic and Electrical Engineering, Faculty of Electronics, 2002. 1997–2000 laboratory assistant in Vilnius Gediminas Technical University, Faculty of Electronics. 2000–2003 engineer designer and 2003–2006 managing engineer designer in JSC “Vilniaus Vingis”. In 2002–2006 – PhD student of Vilnius Gediminas Technical University. At present – technical engineer of representative office of Tyco/Electronics/AMP GmbH.

Superplėčiąsčių lėtinimo ir kreipimo sistemų modeliavimas ir analizė

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

Superplėčiąsčių elektrodinaminės lėtinimo ir kreipimo sistemos plačiai taikomos šiuolaikinėje elektroninėje aparatūroje, radiotechninėse sistemose. Superplėčiąsčių elektrodinaminės lėtinimo sistemos taikomos didesnės galios bėgančiosios bangos mikrobanginių virpesių stiprintuvuose, generatoriuose, analoginiuose skaitmeniniuose keitikliuose, kaip antenos – ryšių technikoje, taip pat taikomos matavimo prietaisuose. Pastaruoju metu tokios sistemos taikytos protonų pluoštui kaupti SNS tipo (*Spallation Neutron Source*) projektuose. Bėgančiosios bangos lėtinimo ir kreipimo sistemos plačiai taikomos plėčiąsčių bėgančiųjų bangų osciloskopiniuose vamzdžiuose elektronų pluoštui kaupti, t.y. oscilografuose, impulsų parametrų matuokliuose ir kituose prietaisuose, skirtuose sparčių vienkartinį procesų tyrimui. 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 kaupti plėčiąsčių 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.

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. 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 (baigtinių skirtumų, baigtinių elementų, momentų, baigtinių skirtumų laiko srities) metodai. Lėtinimo ir kreipimo sistemų analizei vis dažniau taikomi elektromagnetinių laukų skaičiavimo skaitmeniniai metodai, automatizuoto projektavimo programiniai paketai (*Argus*, *HFSS*, *MAFIA*, *XFDTD*, *CST Microwave Studio*). 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 iširti lėtinimo ir kreipimo sistemas, įtakos tyrimas komplikuoatas.

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 elektrodinaminės vėlinimo bei lėtinimo ir kreipimo sistemas, sukūrė tvirtą teorinį pagrindą ir daugeliu teorinių ir praktinių pasiekimų pirmavo pasaulyje. 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.

Kadangi analoginiuose oscilografuose naudojamų bėgančiosios bangos elektroninių vamzdžių ir lėtinimo ir kreipimo sistemų potencinės galimybės dar nepakankamai iširtos, 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 superplėčiąsčių 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 iširti 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 praleidžiamą dažnių juosta ir aukštą veikimo spartą.

Mokslinis naujumas ir praktinė nauda. Sudaryti mažai tirtų lėtinimo ir kreipimo sistemų modeliai, iširtos jų savybės. Remiantis analize ir modeliavimu nustatyti lėtinimo ir kreipimo sistemų variantai, leidžiantys užtikrinti bėgančiosios bangos elektroninių vamzdžių plačiausią praleidžiamą dažnių juosta 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 zondojuančio įtampos šuolio, jo poliškumo, pradinės trajektorijos, pradinio poslinkio įtampos ir lėtinimo ir kreipimo sistemos tipo.

Sudaryti kvazisimetrinės ir dvipradės spiralinių lėtinimo ir kreipimo sistemų modeliai. Išvestos tokių sistemų dispersinės lygtys. Atskleistos kvazisimetrinės konstrukcijos lėtinimo ir kreipimo sistemos lėtinimo koeficiento, įėjimo varžos ir slopinimo priklausomybės nuo dažnio. Patobulinta dvipradės spiralinės sistemos konstrukcija papildomai įdėjus vidinį ekraną, sudaryti modeliai, išvestos dispersinės lygtys ir ištirtos savybės.

Taikant baigtinių skirtumų metodą ištirtas elektrinis laukas dvipradėje spiralinėje lėtinimo ir kreipimo sistemoje ir palygintas su elektriniu lauku vienpradėje spiralinėje sistemoje.

Sudaryti modeliai, leidžiantys atskleisti nevienalytiškumo, atsirandančio dėl laidininkų matmenų kitimo išilgai vijos, dielektrinių laidininkų laikiklių, įtaka sistemos savybėms. Išvestos dispersinės lygtys ir ištirtos sistemų savybės.

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 meandrinų lėtinimo ir kreipimo sistemų modeliai, ištirtos jų savybės. Skaičiuotos lovelinių sistemų lėtinimo koeficiento, įėjimo varžos priklausomybės nuo dažnio. Baigtinių elementų metodu nagrinėtas elektrinis laukas lovelinėse sistemose. Pasinaudojant automatizuoto projektavimo trimačio modeliavimo programiniu paketu *CST Microwave Studio*, sudaryti tokių 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 naudojamas 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 iškraipymų 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 iškraipymų 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, meandrinų, lovelinių lėtinimo ir kreipimo sistemų modeliai, dispersinės lygtys ir analizės rezultatai.
4. Oscilografinių bėgančiosios bangos elektroninių vamzdžių ir lėtinimo ir kreipimo sistemų potencinių galimybių analizė.

Darbo apimtis. Disertaciją sudaro įvadas, šeši skyriai, darbo rezultatų apibendrinimas, priedai, kitų autorių ir autoriaus literatūros sąrašai. Disertacijoje yra 179 kompiuteriu sumaketuoti (tekstų redaktoriumi *Microsoft Word 2002*) teksto puslapiai, 85 paveikslai, 3 lentelės, 15 priedų bendra apimtis 55 puslapiai, 182 bibliografinių šaltinių sąrašas, 17 publikacijų sąrašas.

Bendrosios išvados ir rekomendacijos.

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 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 elektrinio vamzdžio atestavimo rezultatams.
 - 2.3. Dvipradės lėtinimo ir kreipimo sistemos su skirtingo pločio laidininkais praleidžiamų dažnių juosta yra mažesnė nei $1/4t_v$, kur 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. Dvipradės spiralinės sistemos, sudarytos iš dviejų viena į kitą išuktų bendraašių spiralių, savybes galima pagerinti papildomai įdėjus 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 atveju. 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 stiprumą, 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 užtvarinės juostos plotis tuo didesnis, 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, užtvarinės juostos plotis mažėja. 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 mažesnę.

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 sienes.

4.2. Norint dar labiau pagerinti sistemos dispersines charakteristikas naudotinos spiralinių ir meandrinų bėgančiosios bangos lėtinimo ir kreipimo sistemos, kuriose ekranuojančių 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 padidinti iki 12 GHz.

Tomas BUROKAS
**MODELING AND SIMULATION
OF THE SUPER-WIDE-BAND SLOW-WAVE
AND DEFLECTION STRUCTURE**

Summary of Doctoral Dissertation
Technologies Sciences, Electrical Engineering and Electronics (01T)

Tomas BUROKAS
**SUPERPLAČIAJUOSČIŲ LĒTINIMO IR KREIPIMO
SISTEMŲ MODELIAVIMAS IR ANALIZĒ**

Daktaro disertacijos santrauka
Technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija (01T)

20061-04-28. 1,5 sp. I. Tiražas 100 egz.
Leido Vilniaus Gedimino technikos universiteto leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius
Spausdino UAB „Biznio mašinų kompanija“, Gedimino pr. 60,
LT-01110 Vilnius