

УДК 631.371

doi: 10.20998/2218-1849.2019.01.02

Мазур Виктор Анатольевич, ассистент.**Михайлова Людмила Николаевна**, доцент. Подольский государственный аграрно-технический университет, Хмельницкая обл., г.Камянец–Подольский.

Украина, ул. Шевченко, 13, Хмельницкая обл., г. Камянец–Подольский, Украина, 32300

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ГЕНЕРАТОРА НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ ВОЛНОВОДНОЙ СИСТЕМЫ

Приведен анализ колебательной системы со скачкообразным расширением волновода в H -плоскости и определены её параметры для шестидиодного генератора с параллельным включением диодов в общей электродинамической системе. Определен спектр колебаний собственных частот в симметричном H расширении открытого резонатора волноводного типа и условий достижения максимальной выходной мощности при сложении нескольких импульсных ЛПД в резонаторе. Исследованы их энергетические и частотные характеристики. В качестве открытого резонатора волноводного типа рассмотрено симметричное расширение прямоугольного волновода в H - плоскости. Показано, что прямоугольные волноводы со скачкообразным расширением в H -плоскости являются наиболее простыми открытыми резонаторами и могут найти практическое применение в качестве сумматоров мощностей активных элементов в сантиметровом и миллиметровом диапазоне длин волн. Предложена схема параллельного включения полупроводниковых импульсных диодов в подобные электродинамические системы, что позволяет существенно увеличить плотность упаковки диодов и улучшить отвод тепла. Анализ пространственного распределения электрического поля «рабочего» колебания позволил получать ценную информацию о расположении пучностей поля, в местах которых помещаются полупроводниковые источники, а также о фазовом портрете поля H колебания, определяющим способ включения этих источников. На основе теоретических исследований получены уравнения для расчёта основных параметров волноводного сумматора мощности импульсного генератора.

Ключевые слова: волноводный резонатор; многодиодный генератор; общая электродинамическая систем; скачкообразное расширение волновода в H -плоскости.

Мазур Віктор Анатолійович, асистент.**Михайлова Людмила Миколаївна**, доцент. Подільський державний аграрно-технічний університет, Хмельницька обл., м. Кам'янець–Подільський.

Україна, вул. Шевченко, 13, Хмельницька обл., м. Кам'янець–Подільський, Україна, 32300

АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ ГЕНЕРАТОРА НА ОСНОВІ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНОЇ ХВИЛЕВОДНОЇ СИСТЕМИ

Наведено аналіз системи, що коливається, з стрибкоподібним розширенням хвилеводу в H -плоскості та визначено параметри для шостидіодного генератора з паралельним включенням діодів у загальнодоступних електродинамічних системах. Визначено спектр колективних власних частот у симетричних розширеннях відкритого резонатора хвилеводного типу та умов досягнення максимальної вихідної потужності при стилізації декількох імпульсних ЛПД в резонаторі. Досліджено їх енергетичні та частотні характеристики. У якості відкритого резонатора волноводного типу розглянуто симетричне розширення прямокутного хвилеводу в H -плоскості. Показано, що прямокутні хвилеводи зі стрибкоподібним розширенням в H -плоскості сумматорів є найбільш простими відкритими резонаторами та можуть знайти практичне застосування у якості сумматорів потужностей активних елементів в сантиметровому і міліметровому діапазоні довжин хвиль. Запропонована схема паралельного включення напівпровідникових імпульсних діодів у подібних електродинамічних системах, що дозволяє значно збільшити щільність упаковки діодів і покращити відвід тепла. Наведено отриману інформацію про розташування пучків поля, в яких розміщені напівпровідникові джерела, а також про фазові портрети поля колеса, що визначають можливість включення цих джерел. На основі теоретичних досліджень отримані порівняння для розрахунку основних параметрів хвилеводного сумматора потужності імпульсного генератора.

Ключові слова: хвилепровідний резонатор; багатодіодний генератор; загальна електродинамічна система; стрибкоподібне розширення хвилеводу в H -площині.

Mazur Viktor Anatoliyevich, Assistant.**Mihailova Ludmila Nikolayevna**, Assistant Professor. Kamyanets-Podolskiy Agrarian and Technical University, Kamyanets-Podolskiy.

Ukraine, Shevchenko st., 13, Kamyanets-Podolskiy, Ukraine, 32300

ANALYSIS OF GENERATOR PARAMETERS ON THE BASE OF ELECTRODYNAMIC WAVE SYSTEM

The analysis of the oscillating system with the waveguide expansion in the H-plane is given and its parameters are determined for a six-diode generator with parallel inclusion of diodes in the general electrodynamic system. The spectrum of oscillations of the natural frequencies in the symmetric expansion of the open waveguide type resonator and the conditions for reaching the maximum output power with the addition of several pulsed LPD in the resonator are determined. Their energy and frequency characteristics are investigated. The symmetric expansion of a rectangular waveguide in the - plane is considered as an open resonator of the waveguide type. Rectangular waveguides with hopping in the H-plane are the simplest open resonators and can find practical applications as power adders of active elements in the centimeter and millimeter wavelengths. The scheme of parallel inclusion of semiconductor pulse diodes in such electrodynamic systems is proposed, which allows to increase significantly the packing density of diodes and to improve heat dissipation. The analysis of the spatial distribution of the electric field of the "working" oscillation allowed to obtain valuable information on the location of the field hollows in the locations of semiconductor sources, as well as on the phase portrait of the oscillation field, which determines the way of inclusion of these sources. On the basis of theoretical studies, equations were obtained to calculate the basic parameters of a waveguide power generator of a pulse generator.

Keywords: waveguide resonator; diode generator; general electrodynamic system; intermittent expansion of the waveguide H-plane.

Введение

Состояние агропромышленного комплекса Украины за последнее десятилетие характеризуется сложившейся и продолжающейся углубляться тенденцией спада производства молока, мяса и шерсти не только за счет уменьшения поголовья, но и за счет их болезней [1].

В современных условиях для лечения животных используются антибиотики, гормоны и другие химические препараты. Антибиотики и другие медикаменты, попадая в организм человека через молоко и мясо коров, угнетают иммунитет, поражают печень и другие органы, что приводит к различным заболеваниям. Поэтому немедикаментозное лечение животных является актуальной задачей [2].

Разработка немедикаментозных методов лечения животных на основе использования радиоимпульсных электромагнитных колебаний связана с исследованиями по созданию высокостабильных источников, отвечающих высоким требованиям по спектру выходных сигналов, диапазону перестройки частоты и мощности выходного сигнала [3, 4]

Из литературных источников следует, что создание малогабаритных диодных генераторов, отвечающих требованиям по мощности излучения, возможно с помощью сумматоров мощности на основе высокодобротных резонаторов [5].

В настоящее время существуют работы [6, 7], в которых рассматриваются методы расчёта коаксиальных, закрытых прямоугольных и цилиндрических резонаторов, открытых бочкообразных резонаторов, но результаты этих исследований не могут быть использованы для создания генераторов на лавинно-пролётных диодах (ЛПД), которые требуют определения числа суммируемых диодов в общей электродинамической системе резонатора с работой каждого диода в режиме максимальной мощности.

Целью данной статьи является определение спектра колебаний собственных частот в симметричном H –расширении открытого резонатора волноводного типа и условий достижения максимальной выходной мощности при сложении нескольких импульсных ЛПД в резонаторе, а также исследование их энергетических и частотных характеристик.

Изложение основного материала

В качестве открытого резонатора волноводного типа будем рассматривать симметричное расширение прямоугольного волновода в H - плоскости. Такой резонатор является открытым, поскольку он нагружен на два полубесконечных волновода, в которые возможно излучение энергии. С электродинамической точки зрения, амплитуды собственных колебаний такого резонатора, зависящие от времени по гармоническому

закону $e^{-i\omega t}$ будут уменьшаться с увеличением времени, а собственные частоты являются комплексными числами с положительной мнимой частью.

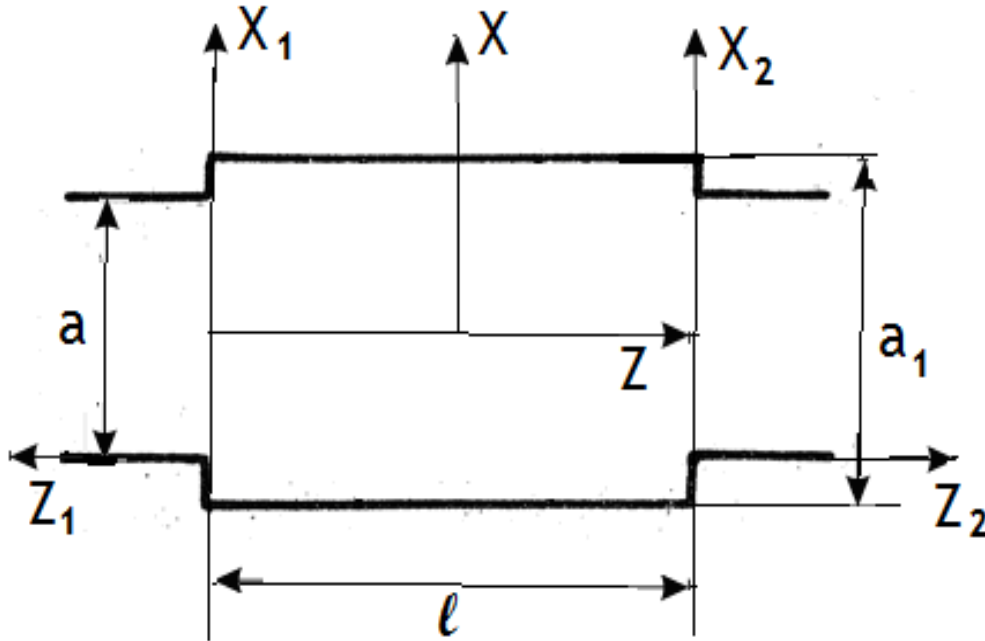


Рис. 1. Симметричное расширение прямоугольного волновода в H -плоскости

Электродинамическая постановка спектральной задачи о собственных частотах и колебаниях волноводного резонатора состоит в определении частоты $\omega = 2\pi f$, при которых существуют нетривиальные решения однородных уравнений Максвелла [8, 9]

$$\text{rot}\vec{E} = i\frac{\omega}{c}\vec{H}; \text{rot}\vec{H} = i\frac{\omega}{c}\vec{E}, \quad (1)$$

где $\text{rot}\vec{E}$ и $\text{rot}\vec{H}$ – удовлетворяющие граничным условиям на поверхности резонатора – равенство нулю тангенциальной составляющей напряженности электрического поля.

Напряженности электрических и магнитных полей таких колебаний имеют следующие компоненты не зависящие от координаты y :

$$\vec{E} = (0, E_y, 0), \quad \vec{H} = (H_x, 0, H_z). \quad (2)$$

В этом случае из (1) с учетом (2) имеем

$$\Delta E_y + K^2 E_y = 0, \quad (3)$$

$$H_x = -\frac{1}{iK} \frac{\partial E_y}{\partial z}, \quad H_z = \frac{1}{iK} \frac{\partial E_y}{\partial x}, \quad (4)$$

где $K = \frac{\omega}{c}$, (c – скорость света в вакууме).

Решение уравнения (3) будем искать методом частичных областей [10]. Для этого рассмотрим три области D_1 , D_2 и D :

$$\begin{aligned} D_1 &= \{(x_1, z_1): 0 \leq x_1 \leq a, z_1 \geq 0\}, \\ D_2 &= \{(x_2, z_2): 0 \leq x_2 \leq a, z_2 \geq 0\}, \\ D &= \left\{ (x, z): -\frac{a_1}{2} \leq x \leq \frac{a_1}{2}, -\frac{l}{2} \leq z \leq \frac{l}{2} \right\}. \end{aligned} \quad (5)$$

Из рис. 1 видно, что области D_1 и D_2 совпадают с полубесконечными волноводами, а область D - с открытым волноводным резонатором. В соответствии с методом частичных областей в каждой из областей D_1, D_2 и D решение уравнения (3) ищем в виде рядов по базисным функциям. Так в областях D_1 и D_2 решение представим в виде

$$\begin{aligned} E_y &= \sum_{n=1}^{\infty} R_n \sin \frac{\pi n}{a} x_1 e^{-i\Gamma_n z_1}, \quad (x_1, z_1) \in D_1, \\ E_y &= \sum_{n=1}^{\infty} T_n \sin \frac{\pi n}{a} x_2 e^{i\Gamma_n z_2}, \quad (x_2, z_2) \in D_2, \end{aligned} \quad (6)$$

а в области D

$$E_y = \sum_{n=1}^{\infty} \sin \frac{\pi(x + a_1/2)}{a_1} (A_{1n} e^{i\Gamma_{1n} z} + A_{2n} e^{-i\Gamma_{1n} z}), \quad (x, z) \in D \quad (7)$$

где $\Gamma_{1n} = \sqrt{K^2 - \left(\frac{\pi \cdot n}{a_1}\right)^2}$.

Легко видеть, что функция (7) удовлетворяет уравнению (3). Для определения неизвестных величин R_n, T_n, A_{1n}, A_{2n} следует воспользоваться граничными условиями

$$E_y|_{z=\pm l/2} = 0, \quad \text{при } \frac{a}{2} \leq x \leq \frac{a_1}{2}, \quad -\frac{a_1}{2} \leq x \leq -\frac{a}{2}, \quad (8)$$

и условиями сопряжения на общих границах областей D_1, D_2 и D . Условия сопряжения состоят в непрерывности тангенциальных компонент электрического и магнитного полей при переходе общих границ частичных областей. Используя (4) и (6), (7) получаем, что на общих границах полубесконечных волноводов и резонатора, т.е. $z = \pm l/2, -\frac{a}{2} \leq x \leq \frac{a}{2}$, должны выполняться соотношения

$$\sum_{n=1}^{\infty} R_n \sin \frac{\pi n}{a} \left(x + \frac{a}{2}\right) = \sum_{n=1}^{\infty} \sin \frac{\pi n}{a_1} \left(x + \frac{a_1}{2}\right) (A_{1n} e^{-i\Gamma_{1n} l/2} + A_{2n} e^{i\Gamma_{1n} l/2}), \quad (9)$$

$$-\sum_{n=1}^{\infty} R_n \Gamma_n \sin \frac{\pi n}{a} \left(x + \frac{a}{2}\right) = \sum_{n=1}^{\infty} \Gamma_{1n} \sin \frac{\pi n}{a_1} \left(x + \frac{a_1}{2}\right) (A_{1n} e^{-i\Gamma_{1n} l/2} + A_{2n} e^{i\Gamma_{1n} l/2}), \quad (10)$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} T_n \sin \frac{\pi n}{a} \left(x + \frac{a}{2} \right) = \sum_{n=1}^{\infty} \sin \frac{\pi n}{a_1} \left(x + \frac{a_1}{2} \right) (A_{1n} e^{i\Gamma_{1n}l/2} + A_{2n} e^{-i\Gamma_{1n}l/2}), \quad (11)$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} T_n \Gamma_n \sin \frac{\pi n}{a} \left(x + \frac{a}{2} \right) = \sum_{n=1}^{\infty} \Gamma_{1n} \sin \frac{\pi n}{a_1} \left(x + \frac{a_1}{2} \right) (A_{1n} e^{i\Gamma_{1n}l/2} - A_{2n} e^{-i\Gamma_{1n}l/2}). \quad (12)$$

Кроме условий сопряжения следует потребовать выполнения граничных условий (8). Подставляя (7) в (8) имеем

$$\sum_{n=1}^{\infty} \sin \frac{\pi n}{a_1} \left(x + \frac{a_1}{2} \right) (A_{1n} e^{-i\Gamma_{1n}l/2} + A_{2n} e^{i\Gamma_{1n}l/2}) = 0. \quad (13)$$

Эти равенства должны выполняться при $\frac{a}{2} < x < \frac{a_1}{2}$ и $-\frac{a_1}{2} < x < -\frac{a}{2}$.

В результате теоретических исследований были получены уравнения для расчёта основных параметров волноводного сумматора мощности импульсного генератора:

$$\begin{cases} 1 - 4 \sum_{p=1}^{\infty} \bar{A}_{p1} \bar{B}_{1p} \operatorname{Re} \left[\frac{i\sqrt{\kappa^2 - p^2/4\theta^2}}{\sqrt{\kappa^2 - 0,25}} \operatorname{ctg} \left(\sqrt{\kappa^2 - \frac{p^2}{4\theta^2}} \pi L \right) \right] = 0, \\ 1 - 4 \sum_{p=1}^{\infty} \bar{A}_{p1} \bar{B}_{1p} I_m \left[\frac{i\sqrt{\kappa^2 - p^2/4\theta^2}}{\sqrt{\kappa^2 - 0,25}} \operatorname{ctg} \left(\sqrt{\kappa^2 - \frac{p^2}{4\theta^2}} \pi L \right) \right] = 0, \end{cases} \quad (14)$$

где $\kappa^2 = \kappa'^2 \left(1 - \frac{i}{2Q} \right)^2$; $L = \frac{\ell}{a}$; $\theta = \frac{a_1}{a}$; $Q = \kappa'/2\kappa''$;

$$\bar{A}_{p1} = \frac{i^{p+1}}{2\pi} \left[\frac{((-1)^1 + (-1)^p) \sin \left(\frac{\pi \cdot 1}{2\theta} - \frac{\pi \cdot p}{2} \right)}{1 - p\theta} - \left(1 - (-1)^{1+p} \right) \frac{\sin \left(\frac{\pi \cdot 1}{2\theta} + \frac{\pi \cdot p}{2} \right)}{1 + p\theta} \right]; \quad (15)$$

$$\bar{B}_{1p} = \frac{i^{1+p}}{2\pi} \left[\frac{((-1)^1 + (-1)^p) \sin \left(\frac{\pi \cdot p\theta}{2} - \frac{\pi \cdot 1}{2} \right)}{p - \frac{1}{\theta}} - \left(1 - (-1)^{1+p} \right) \frac{\sin \left(\frac{\pi \cdot p\theta}{2} + \frac{\pi \cdot 1}{2} \right)}{p + \frac{1}{\theta}} \right]$$

Системы уравнений (14) и (15) можно рассматривать относительно двух искомым параметров θ и L при заданных значениях нормированной частоты κ и добротности Q . Численное решение уравнений (14) и (15) проводилось методом Ньютона [10]. На рис.2 в

координатах θ, L представлены линии равных добротностей H_{203} - колебания, каждой точке которых отвечают определенные значения реальной части нормированной собственной частоты κ'_{23} . С помощью этих данных расчетов можно установить размеры волноводного резонатора, поддерживающего H_{203} - колебание с заданными добротностью Q и реальной частью частоты.

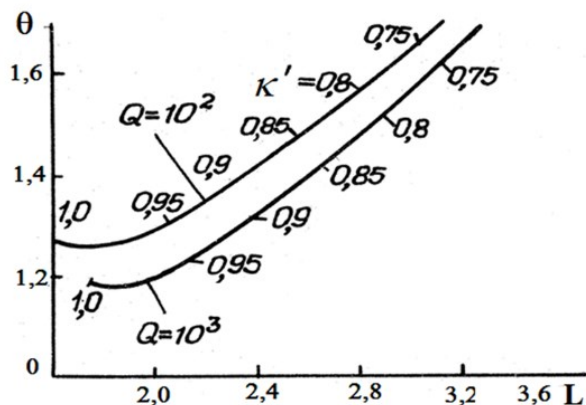


Рис.2. Зависимость $\theta(L)$ для H_{203} - колебания

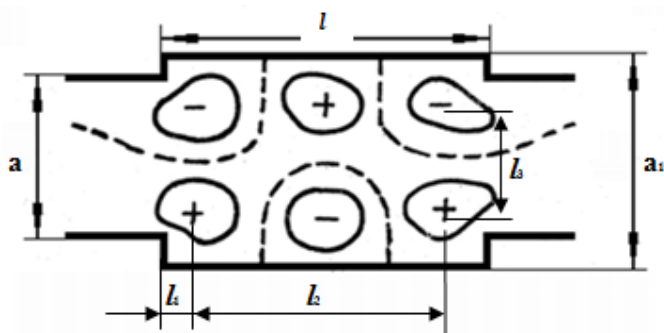


Рис. 3. Конструктивные параметры электродинамической системы шестидиодного генератора

В результате численного анализа полученных результатов были определены параметры электродинамической системы шести диодного генератора в миллиметровом диапазоне длин волн:

$$l = 23,68\text{мм}; a=7,4\text{мм}; a_1=12,36\text{мм}; b=1,7\text{мм}; l_1 = \frac{\lambda_0}{4} = 2,43\text{мм}; l_2 = \frac{\lambda_0}{2} = 4,86\text{мм};$$

$$\lambda_0 = 9,73\text{мм}; Q=10^3; f=31\text{ГГц}.$$

Выводы

Анализ пространственного распределения электрического поля «рабочего» колебания позволяет получать ценную информацию о расположении пучностей поля, в местах которых помещаются полупроводниковые источники, а также о фазовом портрете поля H_{203} - колебания, определяющим способ включения этих источников.

Список использованной литературы

1. Никитина В. Я. Ветеринарное акушерство, гинекология и биотехнология размножения [Текст] / В. Я. Никитина, М. Г. Миролюбов // М.: Колос. – 2000. – 370 с.
2. Антипов В. А. Эффективность и перспективы применения антибиотиков / В. А. Антипов // Ветеринария. – 1980. - №212. – С. 55 -57.
3. Михайлова Л. Н. Применение электромагнитного поля крайневысокой частоты для лечения животных / Л. Н. Михайлова// Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. - №1. – С. 13-16.
4. Karu, T.I. Cellular effect of low power laser therapy can be mediated by nitric oxide [Text] / T.I. Karu, L.V. Pyatibrat, N.I. Afanasyeva // Lasers in Surgery and Medicine. – 2005. - № 36(4). – P. 307-314. – Available at: \www/URL: doi:10.1002/Ism.20148m.
5. Михайлова Л. Н. Определение параметров электродинамической системы многодиодного генератора крайневысокоочастотного диапазона / Л. Н. Михайлова // Вісник національного технічного університету «ХПІ». Нові рішення в сучасних технологіях. - 2011.-№54.-С.138-141.
6. Козак А.В. Анализ энергетических характеристик многодиодного генератора на лавинно-пролётных диодах[Текст]/ Козак А.В., А.В. Архипов // Вестник национального технического университета "ХПИ". Сборник научных работ. Проблемы усовершенствования электрических машин и аппаратов. - 2011- №48-С.105-110.
7. Касаткин Л. Твердотельные импульсные генераторы на ЛПД миллиметрового диапазона волн / Касаткин Л. // Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ.- 1996.- Вып.2- С.41-47.
8. Рудь Л.А. Свободные колебания H – плоскостного волноводного T – тройника [Текст]/Л.А. Рудь // Радиотехника и электроника. – 1988. – 33, №10. – С.2034-2042.
9. Шестопапов В.П. Спектральная теория и возбуждение открытых структур[Текст]/ В.П. Шестопапов. – Киев: Наук. думка, 1987.- 288 с.
10. Канторович Л.В. Функциональный анализ[Текст]/ Л.В.Канторович, Г.П. Акимов. – М.: Наука, 1977. - 742 с.

References

1. Nikitina V.Y. Veterinary obstetrics, gynecology and reproductive biotechnology [Text] / V. Y. Nikitin, M.G. Mirolubov // M.: Kolos. – 2000. – 370 p.
2. Antipov V.A. Effectiveness and prospects for the use of antibiotics [] / V.A. Antipov // Veterinary Medicine. – 1980. – № 212. – P. 55 -57.
3. Mikhailova L.N. Application high frequency electromagnetic field in the treatment of animals [Text] / L.N. Mikhailova // Eastern European Journal of advanced technologies. - 2012. - №1. - P. 13-16.
4. Karu, T.I. Cellular effect of low power laser therapy can be mediated by nitric oxide [Text] / T.I. Karu, L.V. Pyatibrat, N.I. Afanasyeva // Lasers in Surgery and Medicine. – 2005. - № 36(4). – P. 307-314. – Available at: \www/URL: doi:10.1002/Ism.20148m.
5. Mikhailova L.N. Calculation of parameters of the electrodynamic system of high frequency diode generator / L.N. Mikhailova // Journal of the National Technical University “KPI”. New solutions in modern technologies. – 2011. – №54. – P.138-141.
6. Kozak A.V. Analysis of energy characteristics of avalanche transit time diodes generator / A.V. Kozak, A.V. Arkhipov // Journal of National Technical University “KPI”. Collection of scientific works. Problems of improvement of electrical machinery and apparatus. –2011– №48 – P.105-110.
7. Kasatkin L. Solid pulse IMPATT millimeter wave generators. / L. Kasatkin // Electronic equipment. Series 1. Microwave Electronics – 1996. – Issue 2 – P.41-47.
8. L.A. Rud. Free oscillations of H -plane waveguide tee [Text] / L.A. Rud // Technology and Electronics. – 1988 – 33, №10. – P. 2034-2042.
9. V.P. Shestopalov. The spectral theory and excitation of open structures [Text] / V.P. Shestopalov. // Kiev, – Scientific Thought, 1987.- 288 p.
10. L. V. Kantorovich. Functional analysis [Text] / L. V. Kantorovich, G. P. Akimov. – M.: Nauka, 1977. – 742 p.

Прийнята до друку 22. 10. 2019 р.