

УДК 631.371

В. А. МАЗУР

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СО СКАЧКООБРАЗНЫМ РАСШИРЕНИЕМ ВОЛНОВОДА В Н-ПЛОСКОСТИ

Приведен анализ колебательной системы со скачкообразным расширением волновода в плоскости - Н и определены её параметры для шестидиодного генератора с параллельным включением диодов в общей электродинамической системе. Прямоугольные волноводы со скачкообразным расширением в Н – плоскости являются наиболее простыми открытыми резонаторами. Такие электродинамические системы могут найти практическое применение в качестве сумматоров мощностей активных элементов в сантиметровом и миллиметровом диапазоне длин волн.

**Ключевые слова:** волноводный резонатор, многодиодный генератор, общая электродинамическая систем, скачкообразное расширение волновода в Н- плоскости.

**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 высокочастотных резонаторов [5].

### Анализ последних достижений и публикаций.

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.

**Цель статьи.** Целью данной статьи является определение спектра колебаний собственных частот в симметричном Н – 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 Н - плоскости. Такой резонатор является открытым, поскольку он нагружен на два полу-

бесконечных 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.

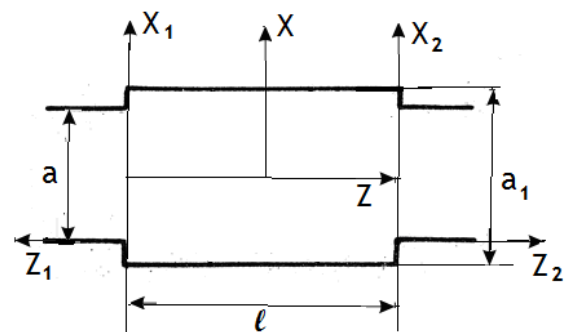


Рис. 1 - Симметричное расширение прямоугольного волновода в Н – плоскости

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].

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

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).

© В. А. Мазур, 2015

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Системы уравнений (14) и (15) можно рассматривать относительно двух искомого параметров  $\theta$  и  $L$  при заданных значениях нормированной частоты  $\kappa$  и добротности  $Q$ . Численное решение уравнений (14) и (15) проводилось методом Ньютона [10]. На рис. 2 в координатах  $\theta, L$  представлены линии равных добротностей  $N_{203}$  - колебания, каждой точке которых отвечают определенные значения реальной части нормированной собственной частоты  $\kappa'_{23}$ . С помощью этих данных расчетов можно установить

размеры волноводного резонатора, поддерживающего  $H_{203}$  - колебание с заданными добротностью  $Q$  и реальной частью частоты.

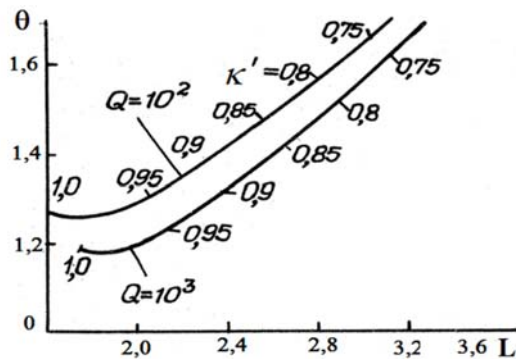


Рис. 2 - Зависимость  $\theta(L)$  для  $H_{203}$  - колебания

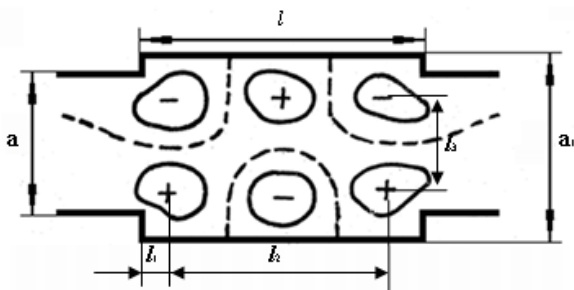


Рис. 3 – Конструктивные параметры электродинамической системы шестидиодного генератора

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 литературы:** 1. *Никитина, В. Я.* Ветеринарное акушерство, гинекология и биотехнология размножения [Текст] / В. Я. Никитина, М. Г. Мирлюбов // М.: Колос. – 2000. – 370 с. 2. *Антипов, В. А.* Эффективность и перспективы применения антибиотиков [Текст] / В. А. Антипов // Ветеринария. – 1980. – №212. – С. 55-57. 3. *Михайлова, Л. Н.* Применение электромагнитного поля крайневисокой частоты для лечения животных [Текст] / 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. 5. *Михайлова, Л. Н.* Определение параметров электродинамической системы многодиодного генератора крайневисококачественного диапазона [Текст] / 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-пролетных диодах [Текст] / А. В. Козак, 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 [Текст] / Л. Касаткин // Электронная техника. Серия 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. *Шестопалов, В. П.* Спектральная теория и возбуждение открытых структур [Текст] / В. П. Шестопалов. – Киев: Наук. думка, 1987. – 288 с. 10. *Канторович, Л. В.* Функциональный анализ [Текст] / Л. В. Канторович, Г. П. Акимов. – М.: Наука, 1977. – 742 с.

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

Поступила (received) 07.06.2015

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Мазур Виктор Анатольевич** – ассистент, Подольский государственный аграрно-технический университет, кафедра «Энергетика и электротехнические системы в АПК»; e-mail: [kosnatgen@ukr.net](mailto:kosnatgen@ukr.net).

**Мазур Віктор Анатолійович** – ассистент, Подільський державний аграрно-технічний університет, кафедра «Енергетика та електротехнічні системи в АПК»; e-mail: [kosnatgen@ukr.net](mailto:kosnatgen@ukr.net).

**Mazur Victor** – assistant, Podolsky State Agricultural University, Department “Energy and electrical systems in the agricultural sector”; e-mail: [kosnatgen@ukr.net](mailto:kosnatgen@ukr.net).