

Черенков Александр Данилович, д-р техн. наук, профессор.

Тел. (063) 416 54 08. E-mail: sm261245@gmail.com

Косулина Наталья Геннадьевна, д-р техн. наук, профессор. Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко, г. Харьков, Украина.

Ул. Алчевских, 44, г. Харьков, Украина, 61002

АНАЛИЗ МЕТОДА СТАБИЛИЗАЦИИ ЧАСТОТЫ ДИОДНОГО ГЕНЕРАТОРА

В статье представлены результаты теоретического анализа параметров синхронизирующего диодного генератора, частота которого стабилизирована высокодобротным цилиндрическим резонатором проходного типа. В качестве источника синхронизирующего сигнала использован генератор на ЛПД, со стабилизирующим по частоте высокодобротным объемным резонатором проходного типа. Стабилизация частоты в генераторе на безкорпусном лавинно-пролётном диоде осуществляется высокодобротным цилиндрическим объемным резонатором проходного типа. В результате теоретического анализа в статье на основе эквивалентной схемы установлены параметры бескорпусного диода, определены величина связи высокодобротного цилиндрического резонатора с волноводной системой генератора и её конструктивные параметры. Доказано, что получение относительной неустойчивости частоты генератора в пределах 10^{-6} - 10^{-7} степени возможно с синхронизацией частоты сумматора мощности сигналом внешнего высокостабильного генератора, у которого для стабильности частоты используется цилиндрический резонатор проходного типа на волне типа TE_{011} с параметрами: $R=32\text{мм}$, $h=7,5\text{мм}$.

Ключевые слова: радиоимпульсный генератор; относительная неустойчивость частоты; диодные генераторы; стабилизирующий высокодобротный объемный резонатор проходного типа.

Черенков Олександр Данилович, д-р техн. наук, профессор. Тел. (063) 416 54 08.

E-mail: sm261245@gmail.com

Косулїна Наталїя Геннадїївна, д-р техн. наук, профессор.

Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. Петра Василенка, м. Харків, Україна, вул. Алчевських, 44, м. Харків, Україна, 61002

АНАЛІЗ МЕТОДА СТАБІЛІЗАЦІЇ ЧАСТОТИ ДІОДНОГО ГЕНЕРАТОРА

У статті представлені результати теоретичного аналізу параметрів синхронізуєчого діодного генератора, частота якого стабілізована високодобротним циліндричним резонатором проходного типу. Як джерело синхронізуєчого сигналу використаний генератор на ЛПД, із стабілізуєчим по частоті високодобротним об'ємним резонатором проходного типу. Стабілізація частоти в генераторі на безкорпусній лавинно-пролітній діод здійснюється високодобротним циліндричним об'ємним резонатором проходного типу. В результаті теоретичного аналізу в статті на основі еквівалентної схеми встановлені параметри бескорпусного діода, визначені величина зв'язку високодобротного циліндричного резонатора з хвилеводною системою генератора і її конструктивні параметри. Доведено, що отримання відносної неустойчивості частоти генератора в межах 10^{-6} - 10^{-7} ступеня можливо з синхронізацією частоти суматора потужності сигналом зовнішнього високостабильного генератора, у якого для стабильності частоти використовується циліндричний резонатор проходного типу на хвилі типу TE_{011} з параметрами: $R = 32\text{мм}$, $h = 7,5\text{мм}$.

Ключові слова: радіоімпульсний генератор; відносна неустойчивість частоти; діодні генератори; стабілізуєчий високодобротний об'ємний резонатор проходного типу.

Cherenkov Aleksandr Danilovich, D-r Sci. Eng., Prof.. Tel. (063) 416 54 08; E-mail: sm261245@gmail.com

Kosulina Nataliya Gennadiyevna, D-r Sci. Eng., Prof..

Kharkov national technical university of agriculture of the name of Peter Vasilenko, Kharkov, Ukraine, Alchevskikh st., 44, Kharkov, Ukraine, 61002

ANALYSIS OF THE DIODE GENERATOR FREQUENCY STABILIZATION METHOD

This article presents the results of a theoretical analysis of the parameters of a synchronizing diode oscillator, the frequency of which is stabilized by a high-quality cylindrical resonator of passage type. An LPD generator with a frequency-stabilizing high-Q pass-through cavity resonator in frequency was used as a source of a synchronizing signal. Frequency stabilization in a generator on a caseless avalanche-span diode is carried out by a high-quality cylindrical pass-through cavity resonator. As a result of a theoretical analysis, the parameters of the open-frame diode are established on the basis of an equivalent circuit, the coupling value of a high-quality cylindrical resonator with the waveguide system of the generator and its design parameters are determined. It is proved that obtaining relative frequency instability of the generator frequency within the range of 10^{-6} - 10^{-7} degrees is possible by synchronizing the frequency of the power adder with a signal from an external highly stable generator, for which

frequency-stability a cylindrical resonator of the through type on a wave of type TE011 with parameters is used: $R = 32\text{mm}$, $h = 7.5\text{mm}$.

Keywords: *radiopulse generator; relative frequency instability; diode generators; stabilizing high-quality transmission type resonator.*

Введение

Научные и практические исследования последних лет показывают, что альтернативой химическому методу защиты растений от насекомых- вредителей может быть метод на основе экологически безопасной и эффективной импульсной электромагнитной технологии. Угнетение насекомых - вредителей растений радиоимпульсным ЭМИ связано не только с процессом высокой скорости нарастания температуры в объекте, но и с информационным действием ЭМП на мембраны клеток насекомых. Практические результаты показывают, что при определенных параметрах импульсного ЭМП (частота следования импульсов, скважность, мощность, частота заполнения импульсов, экспозиция) может происходить разрушение клеточных мембран и гибель насекомых [1]. Из литературного анализ следует, что применение информационных электромагнитных излучений в растениеводстве, для уничтожения вредных - насекомых, возможно с созданием импульсных диодных, высокостабильных по частоте, генераторов [2]. Решение данной задачи возможно на основе суммированием мощностей отдельных диодов в общей электродинамической системе, работающих на применении режима внешней синхронизации генератором, стабилизированного по частоте высокочастотным объемным резонатором проходного или отражающего типа [3]. Из литературных источников следует, что создание таких генераторов является сложной научно- технической задачей [4].

Проведенный анализ показал, что импульсное электромагнитное поле является наиболее эффективным средством для борьбы с вредителями-насекомыми растений [5]. Получение необходимых уровней мощности в диодных генераторах возможно на основе суммирования мощностей [6]. Требования по когерентности и стабильности амплитудно-фазовых параметров в сумматорах может быть реализовано в режиме внешней синхронизации (или пассивного усиления) высокостабильным по частоте непрерывным сигналом. В качестве источника высокостабильного сигнала может быть использован диодный генератор, стабилизированный по частоте высокочастотным объемным или диэлектрическим резонатором [7]. В работе [8] рассматривается использование в сумматоре мощности стабилизации частоты за счёт внешней синхронизации непрерывным сигналом, но расчёта параметров синхронизирующего генератора не приведены. Не приведен теоретический анализ параметров синхронизирующего генератора и в работе для лечения животных [9]. В работах [7] также недостаточно уделено внимание теории анализа синхронизирующего генератора, частота которого стабилизирована высокочастотным резонатором. Таким образом, исследования и разработка радиоимпульсных электронных систем с внешней синхронизацией частоты для уничтожения личинок насекомых- вредителей растений является, несомненно, актуальной задачей.

Цель статьи

Теоретический анализ параметров синхронизирующего диодного генератора, частота которого стабилизирована высокочастотным цилиндрическим резонатором проходного типа.

Изложение основного материала

В качестве источника синхронизирующего сигнала используем генератор на ЛПД, со стабилизирующим по частоте высокочастотным объемным резонатором проходного типа

(рис. 1). Стабилизирующий генератор выполнен в виде волноводно-штыревой конструкции сечением $11 \times 4 \text{ мм}^2$. Диод ЛПД крепится в волноводе с использованием металлического круглого стержня 2, ось которого параллельна вектору ЭП (в прямоугольном волноводе распространяется волна H_{10}). Для предотвращения возможных паразитных колебаний вне диапазона перестройки в цепь питания диода включена поглощающая нагрузка 3. В качестве внешнего стабилизирующего резонатора используется цилиндрический резонатор 5, работающий на TE_{011} типе колебаний и включенной по схеме «на проход». Связь резонатора с волноводной конструкцией осуществляется через отверстия связи 4.

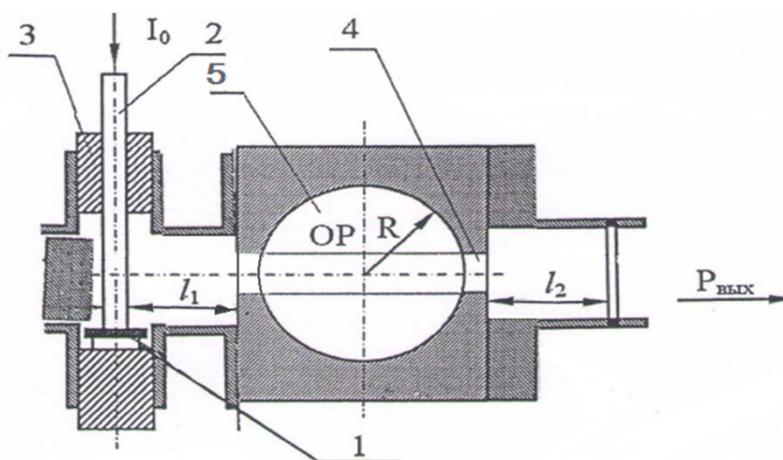


Рис.1. Эскиз конструкции генератора со стабилизирующим объемным резонатором

Перестройка частоты резонатора осуществляется бесконтактным поршнем. На рис. 2 приведена эквивалентная схема синхронизирующего ГЛПД.

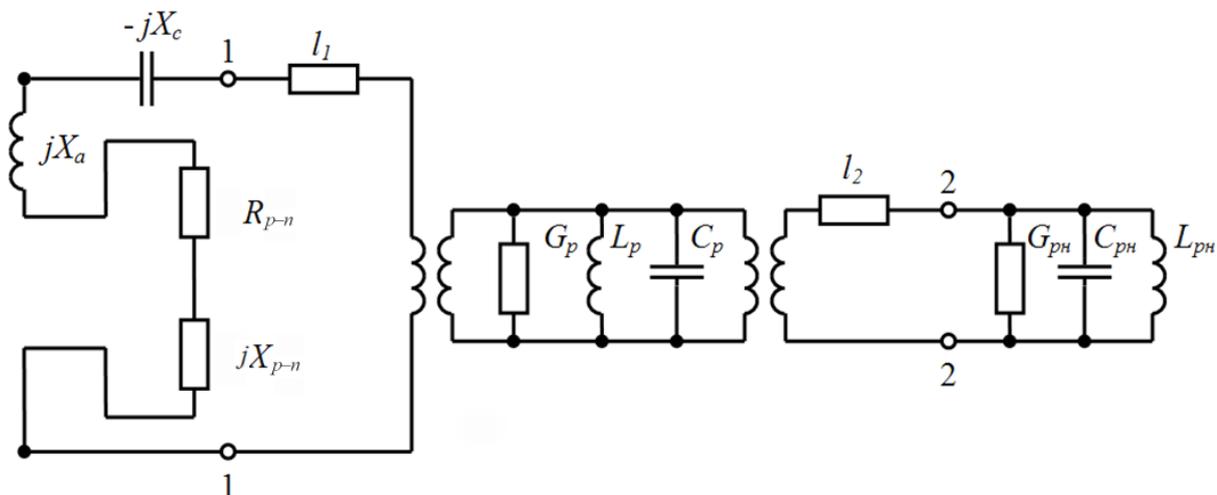


Рис.2. Эквивалентная схема генератора с внешним стабилизирующим резонатором

В эквивалентной схеме (рис. 2) металлический стержень для крепления диода заменён Т-образной эквивалентной схемой. Эквивалентные параметры стержня представлены реактивностями jX_a , и $-jX_c$, которые определяются размерами стержня и размерами волновода. ЛПД генератора представлен элементами R_{p-n} и X_{p-n} , величина которых определяется расчётным путём. Внешний стабилизирующий резонатор 1 характеризуется элементами L_p , C_p , G_p . Расстояние от оси токопроводящего штыря до плоскости отверстия связи учтено отрезком длиной линии l_1 . Перестройка частоты стабилизирующего

резонатора осуществляется бесконтактным поршнем. Сумматором мощности является резонансная многодиодная электродинамическая система, характеризующая элементами $L_{рн}$, $C_{рн}$, $G_{рн}$. В случае, когда все диоды включены в пучность ЭП суммирующего резонатора, то коэффициент трансформации можно считать равным единице. Расстояние от отверстия связи резонатора до плоскости нагрузки учтено отрезком длиной линии l_2 . Эквивалентные параметры стержня были определены из выражений [10]:

$$\frac{X_a}{Z_0} - \frac{X_c}{2Z_0} = \frac{a}{2\lambda_g} \left[S_0 - \left(\frac{\pi d}{2\lambda} \right)^2 - \frac{5}{8} \left(\frac{\pi d}{2\lambda} \right)^4 - 2 \left(\frac{\pi d}{2\lambda} \right)^4 \left(S_2 - 2S_0 \frac{\lambda^2}{\lambda_g^2} \right)^2 \right], \quad (1)$$

$$\frac{X_c}{Z_0} \approx \frac{a}{\lambda_g} \frac{\left(\frac{\pi d}{a} \right)^2}{1 + \frac{11}{24} \left(\frac{\pi d}{a} \right)^2}; \quad (2)$$

$$S_0 = \ln \frac{4a}{\pi d} - 2 + 2 \sum_{n=3,5,\dots}^{\infty} \left[\frac{1}{\sqrt{n^2 - \left(\frac{2a}{\lambda} \right)^2}} - \frac{1}{n} \right]; \quad (3)$$

$$S_2 = \ln \frac{4a}{\pi d} - \frac{5}{2} + \frac{11}{3} \left(\frac{\lambda}{2a} \right)^2 - \left(\frac{\lambda}{a} \right)^2 \sum_{n=3,5,\dots}^{\infty} \left[\sqrt{n^2 - \left(\frac{2a}{\lambda} \right)^2} - n + \frac{2}{n} \left(\frac{a}{\lambda} \right)^2 \right]; \quad (4)$$

$$Z_0 = \frac{b}{a} \frac{120\pi}{\sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}} - \text{характеристическое сопротивление волновода};$$

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{кр})^2}} - \text{длина волны в волноводе}; \quad \lambda = \frac{c}{f} - \text{длина волны в свободном}$$

пространстве; $\lambda_{кр} = 2a$; $a = 11\text{мм}$; $b = 4\text{мм}$; $d = 0,5\text{ мм}$; $\lambda = 15\text{мм}$; $Z_0 = 185\text{ Ом}$; $\lambda_g = 20,4\text{ мм}$; $X_a = 68,4\text{ Ом}$; $X_c = 1,85\text{ Ом}$. Для определения параметров стабилизирующего резонатора были использованы выражения [11]:

$$L_p = \frac{\mu_0 h}{4\pi}, \quad (5)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-9}\text{ Гн/см}$; h – высота резонатора.

$$C_p = \varepsilon_0 \frac{R^2}{(\mu_{ni})^2 h}, \quad (6)$$

где $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-14}\text{ ф/см}$; $\mu_{ni} = 3,832$ – корень функции Бесселя для волны H_{011} ; R - радиус цилиндрического резонатора.

$$Q_p = \frac{1}{\chi} \frac{R}{\left(1 + \frac{R}{h}\right)}, \quad (7)$$

где Q_p – добротность резонатора; $\chi = \sqrt{\frac{2}{\omega_0 \cdot \mu_0 \cdot \sigma}}$; $\sigma = 15,8 \cdot 10^6 \text{ 1/Ом} \cdot \text{м}$ – удельная проводимость латуни.

$$G = \frac{\omega_0 \cdot C_p}{Q_p}, \quad (8)$$

где G – сосредоточенная активная проводимость резонатора [11].

Проведенные расчёты показали, что для резонатора с размерами $R=32\text{мм}$, $h=7,5\text{мм}$, величина параметров резонатора равна: $C_p = 0,0845 \text{ пФ}$,

$$L_p = 7,5 \text{ нГн}, Q_p=5400, G_p=0,235 \cdot 10^{-5} \text{ См.}$$

Так как резонатор предназначен для стабилизации частоты генератора, то в рассматриваемом случае связь между резонатором и волноводной линией l_1 осуществляется щелью диаметром δ (рис.1) в бесконечно тонкой стенке. Элемент связи представляет собой шунтирующую индуктивность для волноводной системы генератора, относительная проводимость которой определяется выражением [12]:

$$\frac{B_u}{Y'_0} = \frac{\lambda}{\pi R} \cdot \frac{(4\pi \cdot R)^2}{\delta^2}, \quad (9)$$

где $Y'_0 = \frac{1}{Z_0} \cdot \frac{\lambda_g}{\lambda} \cdot \frac{a}{4\pi R}$; a - ширина волноводной системы; δ -диаметр элемента связи.

С учётом того, что при резонансе реактивная проводимость резонатора равна нулю, то величина активной проводимости резонатора G' на частоте ω_0 , пересчитанная на конец волноводной линии l_1 , будет определяться из уравнения [12]:

$$G' = G \cdot \frac{Q_p}{Q_{вн}}, \quad (10)$$

где $Q_{вн}$ - внешняя добротность резонатора.

Численный анализ определил, что для $\frac{Q_{вн}}{Q_p} = 0,5$ и $\delta = 2 \text{ мм}^2$, $B_\delta = 1,24 \text{ См}$,

$G' = 0,47 \cdot 10^{-5} \text{ См}$, а сопротивление нагрузки на конце линии l_1 будет равно:

$$\frac{1}{G' - jB_\delta} = \dot{a}_1 + jb_1 = (0,3 \cdot 10^{-5} + j0,81) \text{ Ом.}$$

При реализуемом на практике предположении о малости потерь в высокочастотной цепи определим сопротивление нагрузки волновода слева и справа от проходного резонатора. Слева со стороны резонатора сопротивление нагрузки волновода определяется выражением [12]:

$$Z_{дсл} = \frac{a_1(1 + tg\beta l_1) + j[b_1 + (Z_0 - \frac{b_1^2}{Z_0} - \frac{a_1^2}{Z_0})tg\beta l_1 - b_1 tg^2 \beta l_1]}{1 - (2b_1 / Z_0)tg\beta l_1 + (1 / Z_0^2)(b_1 + a_1)tg^2 \beta l_1}, \quad (11)$$

где $\beta = \frac{2\pi}{\lambda_g}$.

На основании эквивалентной схемы (рис.3.4) сопротивление в плоскости диода будет определяться из уравнения:

$$Z_d = R_{p-n} + j(-X_{p-n} + X_a - X_c). \quad (12)$$

Справа со стороны резонатора нагрузка волновода определяется выражением:

$$Z_{ex2} = Z_0 \frac{\frac{Z_0}{Z_2} + j(\frac{Z_0^2}{Z_2} - 1) \cos \beta l_2 \cdot \sin \beta l_2}{\frac{Z_0^2}{Z_2^2} \cos^2 \beta l_2 + \sin^2 \beta l_2} \quad (13)$$

где $\beta = \frac{2\pi}{\lambda_g}$.

Поскольку нагрузкой волноводной линии с права от резонатора является электродинамическая система с шестью диодами, то нагрузка, создаваемая системой будет определяться выражением

$$Z_2 = -R'_d / 6, \quad (14)$$

где R'_d – активное сопротивление корпускулярного диода 3А762.

Приравнявая действительные и мнимые части (11-14), получаем систему двух уравнений относительно неизвестных l_1 и l_2 :

$$\frac{a_1(1 + tg\beta l_1)}{1 - (2b_1 / Z_0)tg\beta l_1 + 1 / Z_0^2 (b_1 + a_1)tg^2 \beta l_1} = -R_{p-n}; \quad (15)$$

$$\frac{b_1 + (Z_0 - \frac{b_1^2}{Z_0} - \frac{a_1^2}{Z_0})tg\beta l_1 - b_1 tg^2 \beta l_1}{1 - (2b_1 / Z_0)tg\beta l_1 + 1 / Z_0^2 (b_1 + a_1)tg^2 \beta l_1} = (-X_{p-n} + X_a - X_c); \quad (16)$$

$$Z_0 \frac{\frac{Z_0}{Z_2}}{\frac{Z_0^2}{Z_2^2} \cos^2 \beta l_2 + \sin^2 \beta l_2} = a_1 \quad (17)$$

$$Z_0 \frac{\left(\frac{Z_0^2}{Z_2} - 1\right) \cos \beta l_2 \cdot \sin \beta l_2}{\frac{Z_0^2}{Z_2^2} \cos^2 \beta l_2 + \sin \beta l_2} = b_1 \quad (18)$$

В результате решений системы уравнений (15-18) были получены величины длин волноводных отрезков (рис.3.13) $l_1 = 0,4\text{см}$ и $l_2 = 13\text{мм}$.

Относительная нестабильность частоты генератора определялась из соотношения [4]

$$\frac{\omega_p - \omega_z}{\omega_z} = \frac{\Delta \omega}{\omega_z}, \quad (19)$$

где ω_z – частота генерации; ω_p – частота резонатора.

Частота генерации определялась из уравнения (16), приравнявая нулю реактивную составляющую генератора. Численный анализ определил величину частоты генератора в пределах $\omega_z = 125,6638 \cdot 10^9$ рад. Учитывая, что круговая резонансная частота резонатора равна $125,664 \cdot 10^9$ рад, относительная нестабильность частоты генератора составила $1,6 \cdot 10^{-6}$.

Выводы

Получение относительной нестабильности частоты генератора в пределах 10^{-6} - 10^{-7} степени возможно с синхронизацией частоты сумматора мощности сигналом внешнего высокостабильного генератора, у которого для стабильности частоты используется цилиндрический резонатор проходного типа на волне типа TE_{011} с параметрами: $R=32\text{мм}$, $h=7,5\text{мм}$, величина параметров резонатора равна: $C_p = 0,0845 \text{ пФ}$, $L_p = 7,5 \text{ нГн}$, $Q_p=5400$, $G_p=0,235 \cdot 10^{-5} \text{ См}$; диаметр элемента связи резонатора с волноводной системой 2мм.

Список использованной литературы

1. 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.
2. Клейман А. С. Некоторые вопросы создания и применения широкодиапазонных КВЧ источников колебаний[Текст] / [Клейман Л. С., Кравченко П. А., Кучин Л. Ф. и др.] – Харьков: Украинский метрологический журнал, 1999. – № 2. – С. 20 – 23.
3. Касаткин Л. В. Стабилизация СВЧ-параметров стационарного синхронного режима импульсных генераторов на ЛПД. Изв. ВУЗов. Радиоэлектроника[Текст]. -2001.- Том 44, №3.- С. 18-25.
4. Зырин С. С. Стабильность частоты и выходная мощность пролётного автогенератора с колебательной системой произвольного типа[Текст]/С.С.Зырин//Электронная техника,серия «Электроника СВЧ».-1970.-Вып.10.- С.30-42.
5. Дубик В. Н. Защита плодовых культур от насекомых-вредителей/В.Н. Дубик// Вестник Национального технического университета «ХПИ».-2011.-№12.-С.121-129.
6. Коцержинский Б.А. Импульсные генераторы миллиметрового диапазона волн на лавинно-пролетных диодах / Б.А. Коцержинский, В.П. Тараненко, В.А. Трапезон // Известия вузов СССР, 1982. – Т. XX, №10. – С.56-64.
7. Горбачев А.В., Касаткин Л.В. Каскадное суммирование мощностей ЛПД в режиме внешней синхронизации/ Касаткин Л.В. // Электронная техника. – 1982.- Вып.10.- С. 22-27.

8. Михайлова Л. Н. Определение параметров электродинамической системы многодиодного генератора крайневисокочастотного диапазона[Текст] / Л. Н. Михайлова // Вісник національного технічного університету «ХПІ». Нові рішення в сучасних технологіях.- 2011.-№54.-С.138-141.
9. Михайлова Л. Н. Применение электромагнитного поля крайневисокой частоты для лечения животных[Текст] / Л. Н. Михайлова // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. - 2012. - №1/9(55). - С.13-16.
10. Коваленко В.Ф. Введение в электронику сверхвысоких частот/В.Ф. Кова-ленко.-М.:Сов. Радио,1955.-344с.
11. Крылов Н.Н. Теоретические основы радиотехники[Текст]/Н.Н. Крылов.-М.: «Морской транспорт»,1961.-416с.
12. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ[Текст]/И.В. Лебедев.-М.: «Высш. школа»,1970.-440с.

Referenses

1. Kozak A. V. Analysis of energy characteristics of avalanche transit time diodes generator [Text] / 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.
2. Kleiman A. S. Questions of creation and application of wide-range UHF oscillation sources [Text] / [Kleiman A. S., Kravchenko P. A., Kuchin L.F.] – Kharkiv: Ukrainian Journal of Metrology, 1999. – № 2. – P. 20–23.
3. Kasatkin L. Stabilization of microwave parameters of stationary synchronous mode of pulse generators in the LPD. Radio Electronics [text]. – 2001. – Т. 44, № 3. – P. 18–25.
4. Zyrin S. S. The frequency stability and output power of oscillator with an oscillating system of any type [Text] /S.S.Zyrin// Electronic devices, series of “Microwave Electronics” . – 1970. —Iss.10. – P. 30–42.
5. Dubik V. N. Protection of fruit plants from pests [Text] /V. N. Dubik // Jouranl of the National Technical University “KPI”. – 2011. – № 12. – P. 121–129.
6. Kotserzhinsky B. A. Pulse millimeter wave generators on avalanche-transit diodes / B. A. Kotserzhinsky, V. P. Taranenko, V. A. Trapezon // News of the universities of the USSR, 1982. – Т. XX, №10. – P. 56–64.
7. Gorbachev A. V., Kasatkin L.V. Cascading power addition of LPD in external synchronization mode / A. V. Gorbachev, L. V. Kasatkin // Electronic equipment. –1982. – Iss.10. – P. 22–27.
8. Mikhailova L. N. Calculation of parameters of the electrodynamic system of ultra-high frequency diode generator [Text] / L. N. Mikhailova // Journal of the National Technical University “KPI”. New solutions in modern technologies. – 2011. – №54. – P.138–141.
9. 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.
10. Kovalenko V. F. Introduction to Electronics of ultra-high frequency / V. F. Kova lenko. – М., Sov. Radio, 1955. – 344 p.
11. Krylov N. N. Theoretical Fundamentals of Radiotechnics [Text] / N. N. Krylov. – М.: "Morskoy transport", 1961. – 416 p.
12. Lebedev I. V., Microwave Technics and Devices [Text] /Y. V. Lebedev. – М.: “Vush. Shkola”, 1970. – 440 s.

Прийнята до друку 10.10. 2019 р.