

УДК 621.373.5

Зенив І.О., ст. преподаватель;
Крылов В.М., ст. преподаватель

МАЛОГАБАРИТНЫЙ ГЕТЕРОДИН НА ДИОДЕ ГАННА ВОСЬМИМЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА СТАБИЛИЗИРОВАННЫЙ ВЫСОКОДОБРОТНЫМ РЕЗОНАТОРОМ

Zeniv I.O., Krylov V.M. Small heterodyne of 8-millimetr range using the Gunn diode stabilized by high-Q resonator. We designed the system generator based on Gunn diodes stabilized in frequency by surround resonator. Gunn's diode is included in the coaxial line connected with a cylindrical resonator. The availability of coaxial load in the diode supply chain improves the stability of the generator at various external influences and simplifies it. The output power is regulated by the connection of resonator and waveguide. The frequency restructuring is provided by the moving the piston that operates on the fluctuation H_{011} . The generator configuration is performed by moving the diode and anti-parasitic load in a coaxial waveguide.

The characteristics of the generator were studied. Using graphic and analytical method we specified the conditions of the generation stability and the options: stabilizing factor and efficiency scheme. The performance requirements for applied diodes are defined. Dependence parameters of the resonator coefficient due to the output load is shown. The generator options allow you to use it as a local oscillator for high frequency receivers.

Keywords: diode, generator Gunn, resonator, stabilizing factor, efficiency

Зенив І.О., Крылов В.М., Малогабаритний гетеродин на діоді Ганна восьмиміліметрового діапазону стабілізований високодобротним резонатором. Розроблено схему генератора на діоді Ганна, стабілізованого за частотою прохідним об'ємним резонатором. Досліджено характеристики генератора. За допомогою графоаналітичного методу визначені умови стійкості генерації і параметри: коефіцієнт стабілізації і ККД схеми. Визначено вимоги до характеристик застосовуваних діодів. Показані залежності параметрів від коефіцієнта зв'язку резонатора з вихідним навантаженням. Параметри генератора дозволяють використовувати його в якості гетеродина для приймачів НВЧ.

Ключові слова: діод, генератор Ганна, резонатор, коефіцієнт стабілізації, ККД

Зенив І.О., Крылов В.М., Малогабаритный гетеродин на диоде Ганна восьмимиллиметрового диапазона стабилизированный высокодобротным резонатором. Разработана схема генератора на диоде Ганна, стабилизированного по частоте проходным объемным резонатором. Исследованы характеристики генератора. С помощью графоаналитического метода определены условия устойчивости генерации и параметры: коэффициент стабилизации и КПД схемы. Определены требования к характеристикам применяемых диодов. Показаны зависимости параметров от коэффициента связи резонатора с выходной нагрузкой. Параметры генератора позволяют использовать его в качестве гетеродина для приемников СВЧ.

Ключевые слова: диод, генератор Ганна, резонатор, коэффициент стабилизации, КПД

Вступление

Актуальным в настоящее время является построение высокочувствительных приемных устройств в диапазоне СВЧ. Для этого необходимым является применение малогабаритного гетеродина, стабилизированного по частоте с малым уровнем частотных шумов. Рассматриваемый генератор выполняет функцию такого гетеродина.

В результате анализа полосно-отражательной схемы генератора с проходным резонатором получены качественные характеристики генератора при определённых параметрах диода Ганна.

Способом параметрической стабилизации частоты генераторов СВЧ является подключение дополнительного резонатора, обладающего повышенной добротностью и устойчивостью параметров к влиянию дестабилизирующих факторов. При рассмотрении характеристик гетеродина пользуемся методом, предложенным в [1].

Работу генератора представляем как взаимодействие активного элемента и его нагрузки в виде колебательной системы.

Включение в колебательную систему резонатора приводит к увеличению потерь энергии и к снижению КПД. КПД определяется отношением выходной мощности стабилизированного генератора к выходной мощности генератора в волноводном включении.

1. Конструкция гетеродина

В отличие от других схем, где диод включен в волноводное сечение, в данном случае его включение выполнено в коаксиальную линию. Стабилизирующий резонатор включён между диодом и согласованной нагрузкой. Центральный проводник коаксиальной линии является токоведущим элементом для питания диода. Конструкция гетеродина представлена на рис. 1.

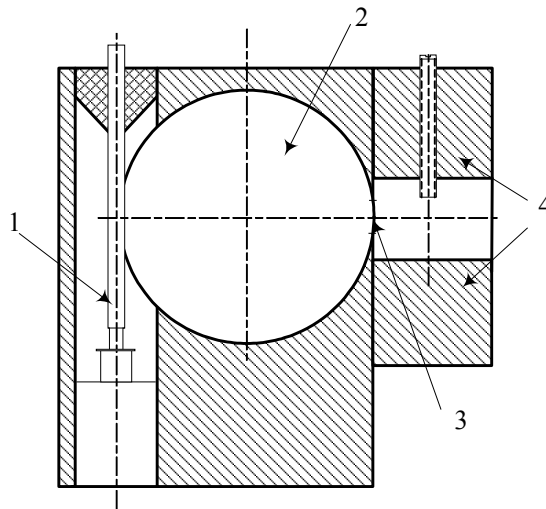


Рис. 1. Конструкция гетеродина:

- 1 – коаксиальная камера с диодом и поглотителем; 2 – цилиндрический резонатор на типе колебаний H_{011} ;
3 – выходное отверстие; 4 – выходной фланец 7.2×3.4 с винтом, регулирующим выходную мощность

Выходная мощность излучается в волновод через отверстие связи в резонаторе. Форма отверстия прямоугольная. Резонатор цилиндрический - на типе колебаний H_{011} . Образующая его параллельна оси коаксиальной камеры. Связь резонатора с коаксиальной линией выбрана максимальной, такой что «мнимая» образующая резонатора совпадает с центром проводника коаксиальной линии. Длина коаксиальной линии 25 мм. Настройка системы производится перемещением патрона вдоль камеры, в который впаян корпусированный диод. Ее внутренний диаметр 4 мм. Настройка системы производится перемещением патрона с диодом – выбирается электрическая длина между диодом и центром отверстия связи резонатора с камерой. Компенсация реактивной проводимости диода производится перемещением согласованной нагрузки – поглотителем. Конусная часть поглотителя обращена в сторону диода.

2. Эквивалентная схема (генератора) и ее фиксирующая способность

Характерной особенностью этой схемы является наличие двух связей резонатора: – с выходным волноводом (коэффициент β_1); – с диодной камерой (коэффициент β_2). Связь с диодной камерой определяет нагруженную добротность резонатора Q_n . Эквивалентная схема генератора представлена на рис. 2., а упрощенная эквивалентная схема генератора представлена на рис. 3.

В данном случае собственная добротность резонатора $Q_0 = \rho/r$, где r – сопротивление потери, а $\rho = \sqrt{L/C}$. Обычно при настройке с помощью l_2 компенсируют реактивную

проводимість диода, поэтому правую часть схемы можно считать равной 1 (рис. 2.), что дает нам упрощенную эквивалентную схему (рис. 3.).

Исследование работы схемы удобно производить с помощью диаграммы Вольперта-Смитта в варианте проводимости. При графическом обозначении на диаграмме характеристик активного элемента и подводимой к нему нагрузки, определяют точку их пересечения. В этой точке определяется режим генератора, то есть устойчивая ли генерация, какой режим активного элемента и какова фиксирующая способность диодной нагрузки.

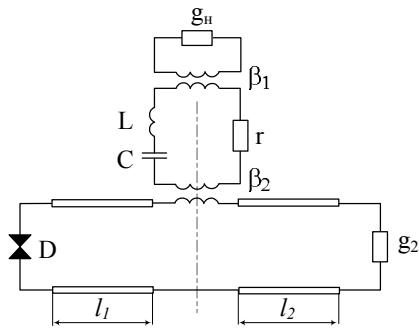


Рис. 2. Эквивалентная схема генератора:

D – диод; l_1 – линия связи диод-резонатор;
 l_2 – линия между поглотителем и резонатором;
 L, C, r – параметры резонатора;
 β_1, β_2 – коэффициенты связи; g_2 – проводимость антипаразитной нагрузки; g_n – волноводная нагрузка (выходная нагрузка генератора)

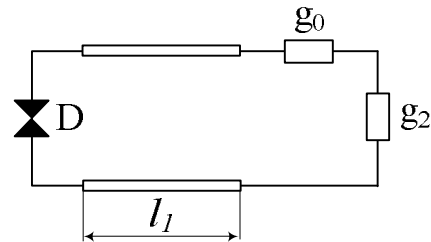


Рис. 3. Упрощенная эквивалентная схема генератора:

D – диод; g_0 – активная проводимость резонатора, учитывающая проводимость нагрузки генератора на резонансной частоте; g_2 – проводимость антипаразитной нагрузки

В окрестности резонансной частоты характеристика резонатора изображается окружностью, проходящей через точку 1 $\left(\text{при } \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \gg 1 \right)$, диаметр которой определяется проводимостью g_0 , то есть величиной связи с резонатором, а положение центра - расстоянием l_1 до активного элемента. При увеличении l_1/Λ , где Λ – длина волны в линии, центр окружности резонатора перемещается по часовой стрелке вокруг точки $Y = 1$, через которую окружность проходит (рис. 4).

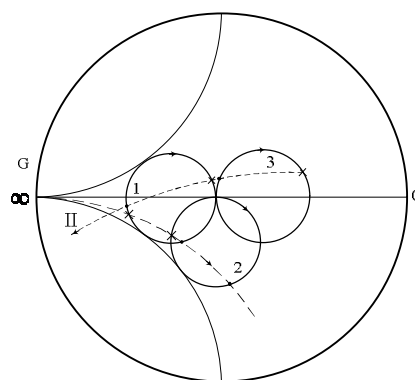


Рис. 4. Характеристика схемы гетеродина

Учитывая то, что возбуждение резонатора происходит, в данном случае, продольными токами в центральном стержне, то резонатор можно представить параллельным контуром, включенным через $l_1 = \Lambda/4$. На рис. 4 показаны настройки: петля 1- представляет резонатор, включенный через $l_1 = \Lambda/2$; петля 2 - $l_1 = 0,375 \Lambda$, петля 3 - $\Lambda/4$. Линиями I, II – представлены характеристики активного элемента, которые рассмотрены ниже. Точками показаны устойчивые режимы генерации, крестом – неустойчивые.

На резонансе, при компенсации реактивности диода, вносимые проводимости, приведенные на диод (рис.3), определяются как $g = \frac{g_0 g_2}{g_0 + g_2}$.

В случае если $g_2 = 1$, то основные характеристики схемы на резонансной частоте стабилизирующего контура описываются формулами:

$$Y_{11} = \frac{g_0}{\cos^2 \psi (1 - g_0^2) + g_0^2} + j \frac{(1 - g_0^2) \sin 2\psi}{2[(1 - g_0^2) \cos^2 \psi + g_0^2]}, \quad (1)$$

$$G_{11} = \frac{g_0}{\cos^2 \psi + g_0^2 (1 - \cos^2 \psi)} = \frac{g_0}{(g_0^2 - 1) \cos^2 \psi - g_0^2}, \quad (2)$$

$$B_{11} = \frac{(1 - g_0^2) \sin 2\psi}{2[(1 - g_0^2) \cos^2 \psi + g_0^2]}. \quad (3)$$

Учитывая, что $S = \frac{\partial Y_{11}}{\partial \omega}$, получаем:

$$S = \frac{g_0}{g_0^2 + (1 + 2g_0) \cos^2 \psi} \left| \frac{g_0(1 + g_0) \sin 2\psi + j[(1 + 2g_0) \cos^2 \psi + g_0^2 \cos 2\psi]}{g_0(1 + g_0) + \frac{j}{2}(1 + 2g_0) \sin 2\psi} \right|. \quad (4)$$

$\Gamma_0 = \frac{1}{1 + 2g_0}$, отсюда $g_0 = \frac{1 - \Gamma_0}{2\Gamma_0}$, где Γ_0 - коэффициент отражения от стабилизирующей системы генератора.

Диодный генераторный элемент может быть представлен параллельным соединением отрицательной активной проводимостью G_d и реактивной проводимостью B_d .

3. Активный элемент и его параметры

Активный элемент – корпусированный диод Ганна. Конструкция активного элемента и включения диода в линию приведены на рис. 5, а эквивалентная схема диода представлена на рис. 6.

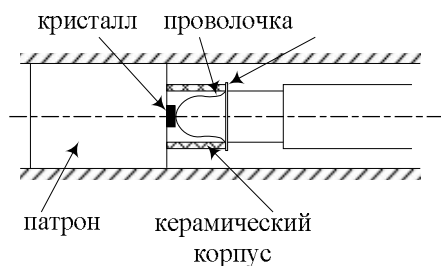


Рис. 5. Конструкция активного элемента, включенного в линию

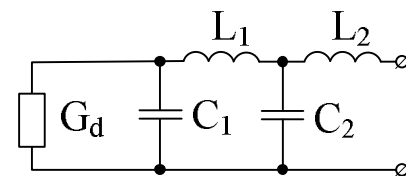


Рис. 6. Эквивалентная схема диода

Здесь G_d – активная соответствующая проводимости диодного кристалла ($G_d < 0$); C_1 – его эквивалентная ёмкость; L_1 – индуктивность проволоки; C_2, L_2 – параметры эквивалентной схемы керамической втулки (с учётом индуктивной проточки стержня, выполненной в случае необходимости).

Приводимая проводимость к зажимам 1 - 1 схемы активного элемента $Y_{11} = G_1 + jB_1$ определяется следующими выражениями:

$$G_1 \rho_1 = G_d \rho_1 \frac{1}{\left[(1 - v^2) \left(1 - \frac{C_2 L_2}{C_1 L_1} v^2 \right) - \frac{L_2}{L_1} v^2 \right] + (G_d \rho_1)^2 v^2 \left[1 + \frac{L_2}{L_1} - \frac{C_2 L_2}{C_1 L_1} v^2 \right]^2}, \quad (5)$$

где v – отношение текущей координаты к собственной частоте контура диода, как кристалла.

$$B_1 \rho_1 = v \frac{\left[1 - \frac{C_2}{C_1} (1 - v^2) \right] \left[(1 - v^2) \left(1 - \frac{C_2 L_2 v^2}{C_1 L_1} \right) - \frac{L_2}{L_1} v^2 - (G_d \rho_1)^2 \frac{C_2}{C_1} v^2 \right]^2}{\left[(1 - v^2) \left(1 - \frac{C_2 L_2 v^2}{C_1 L_1} \right) - \frac{L_2}{L_1} v^2 \right]^2 + (\rho_1 G_d)^2 v^2 \left[1 + \frac{L_2}{L_1} - \frac{C_2 L_2 v^2}{C_1 L_1} \right]^2}, \quad (6)$$

$$\rho_1 = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}, \quad v = \frac{\omega}{\omega_1} = \omega \sqrt{L_1 C_1}. \quad (7)$$

Из эквивалентной схемы и выражений видно, что даже для идеального диода, у которого дифференциальная проводимость частотно независима, характеристики, приведенные к коаксиальному сечению, имеют явно выраженный резонансный характер и диод может генерировать лишь в сравнительно узких частотных интервалах, определяемых параметрами эквивалентной схемы.

Когда проводимость диода мала, схема имеет такие резонансы: последовательный резонанс вблизи частоты $\omega_1 = \sqrt{L_1 C_1}$ – резонанс ветви, $L_1 C_1$ – параллельный резонанс $\omega_{нар} = \sqrt{1 + C_1 / C_2}$. Если проводимость диода велика, то есть $|G_d \rho_1| \gg 1$, ёмкость диода C_1 сильно зашунтирована, первый последовательный резонанс пропадает, частота параллельного резонанса понижается до величины $\omega_{нар} = \sqrt{C_1 / C_2}$.

При $|G_d \rho_1| \sim 1$ изменение активной соответствующей проводимости диода влечет за собой изменения резонансных частот схемы и соответственно ее реактивной резонансной проводимости на фиксированной частоте.

Ориентировочные значения параметров эквивалентной схемы можно определить следующим образом: в типовых диодах миллиметрового диапазона волн используется арсенид галлия с концентрацией носителей $n \sim 2 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$. При этом омическое сопротивление и ёмкость кристалла связаны соотношением $R_0 C_1 \sim 0,3 \text{ пФ} \times \text{Ом}$. Учитывая, что $|G_d \rho_1| = 1 / \omega_1 R_d G_d$ и динамическое сопротивление диода R_d примерно в 20÷30 раз больше омического сопротивления R_0 , можно найти для тех же значений частоты $\omega_1 / 2\pi = 18 \div 38 \text{ ГГц}$:

$$|G_d \rho_1| \approx \frac{1}{\omega_1 R_0 G_d} \frac{R_0}{R_d} = 1,5 \div 0,5.$$

Таким образом, для реальных диодов $|G_d \rho_1| \sim 1$, характеристики диода будут иметь сложный вид, так как при изменении амплитуды СВЧ колебаний изменяется не только активная, но и реактивная составляющая проводимости.

Индуктивность проволоочки L_1 в реальных диодах имеет величину $0,12 \div 0,16 \text{ нГн}$. Параметры L_2, C_2 определяются размерами патрона и проточки в центральном проводнике коаксиала. Грубая оценка этих параметров может быть определена экспериментально по существующим методикам [2], при условии $L_2 = 0, C_2 \approx 0,1 \div 0,2 \text{ пФ}$.

Численные расчёты характеристик диодов выполнялась по уравнениям для интервала значений $0,01 |G_d \rho_1| < 1$. Снизу ограничение определялось значением 0,01.

При расчёте было зафиксирована резонансная частота параллельного контура

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 \frac{C_2 G_d}{C_2 + G_d}}} = \frac{1}{\sqrt{L_1 G_d}} \frac{1}{Y \left(1 + \frac{G_d}{C_2}\right)^2} \quad (8)$$

Рассчитывались характеристики $Y_1 W = Q_1 W + j B_1 W$, нормированные к волноводному сопротивлению коаксиальной линии в зависимости от параметра $|G_d \rho_1|$. При расчёте варьировались параметры C_2 / G_d , L_2 / L_1 , W / ρ_1 .

Волновое сопротивление линии $W = 60 / \sqrt{\epsilon} \ln D_k / d_k = 83$ Ом, где $\epsilon = 1$, $D_k = 4$, $d_k = 1$.

На рис. 7 приведены результаты численных расчётов характеристики диода $Y_d W$ (для наиболее типичного сочетания параметров $C_2 / C_g = 1$, $L_2 / L_1 = 0,25$, $W / \rho_1 = 2,1$). Они нормированы к волновому сопротивлению линии и построены на круговой диаграмме Вольперта - Смита (КДВС). На рисунке приведена часть диаграммы. Каждая характеристика соответствует фиксированной частоте, которая указана рядом с ней. Стрелкой показано направление изменения проводимости диода при увеличении амплитуды СВЧ колебаний. Начало характеристики соответствует значению $|G_d \rho_1| = 1$, а конец $|G_d \rho_1| = 0,01$.

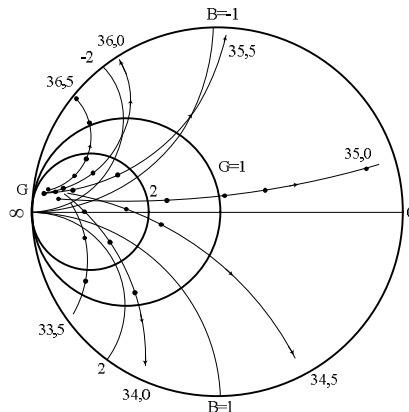


Рис. 7. Типовые характеристики диода, нормированные к волновому сопротивлению линии

4. КПД стабилизированного генератора

Выходная мощность стабилизированного генератора $P_{вых}$ определяется режимом нагрузки на диоде Y_{n1} , Y_{n2} , где Y – условное определение схемы включения нагрузки диода, Y_{n1} – нагрузка для стабилизированного генератора (рис. 8). Выходная мощность этого

генератора равна: $P_{вхст} = \frac{U_{aa}^2 g_{\Sigma}}{2}$, где U_{aa} – амплитуда напряжения на диоде, $g_{\Sigma} = \frac{g_2 g_0}{g_2 + g_0}$.

Упрощенная схема нестабилизированного генератора на рис. 9 отличается от предыдущей схемы отсутствием резонатора.

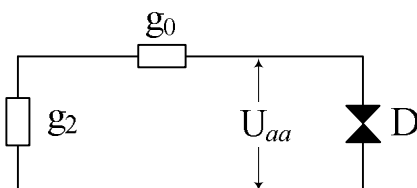


Рис. 8. Упрощенная схема стабилизированного генератора

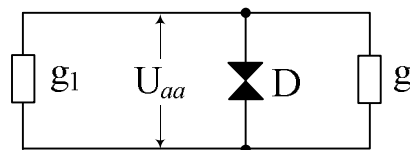


Рис. 9. Упрощенная схема нестабилизированного генератора

На рис. 9: g_n – активная нагрузка генератора, g_1 – подстраиваемая нагрузка, g_{II} – активная проводимость поршня.

Проводимости g_1 , g_{II} – обеспечивают режим на диоде, равный режиму на диоде в стабилизированном генераторе ($U'_{aa} = U_{aa}$).

По определению КПД равно отношению выходных мощностей стабилизированного генератора к нестабилизированному генератору:

$$\eta_c = \frac{P_{\text{вых.ст}}}{P_{\text{вых.нест}}} = \frac{U_{aa}^2 g_{\Sigma}}{(U'_{aa})^2 g_n} \quad \text{т.е.} \quad \eta_c = \frac{g_2 g_0}{(g_2 + g_0)(g_1 + g_{II})}. \quad (9)$$

Для реального КПД должно выполняться условие: $(g_2 + g_0)(g_1 + g_{II}) \geq g_2 g_0$.

Максимальное значение относительной фиксирующей способности схемы (при $\psi = \pi/2$) имеет вид: $S = 1/(1 + g_0)$. Воспользовавшись выражениями (9) можно вычислить величину $\eta_c + S$ для рассматриваемой схемы:

$$\eta_c + S = \frac{g_2 g_0}{(g_2 + g_0)(g_1 + g_{II})} + \frac{1}{1 + g_0}.$$

Если учесть, что $g_2 = 1$, а g_1 близка к согласованной ($g_1 \rightarrow 1$) и потери в поршне равны нулю ($g_{II} \rightarrow 0$), тогда $\eta_c + S = \frac{g_0}{1 + g_0} + \frac{1}{1 + g_0} = 1$. Т.е. при любой связи диодной секции с резонатором должно выполняться условие $\eta_c + S = 1$, как показано на рис. 10.

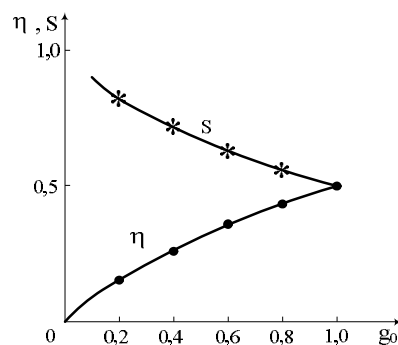


Рис. 10. Зависимость КПД и относительной фиксирующей способности от степени включения стабилизирующего резонатора

Из общей эквивалентной схемы следует, что $g_0 = \frac{g_p}{\beta_1}$, $g_n = \frac{g_p}{\beta_2}$, где g_0 – проводимость резонатора; g_p – собственная проводимость резонатора; g_n – проводимость выходного волновода, и они приведены к проводимости диодной секции (коаксиала); β_1 – коэффициент связи с волноводной нагрузкой, β_2 – коэффициент связи резонатора с диодной секцией.

Поэтому $g_0 = \frac{\beta_1}{\beta_2} g_n$. С учетом этого для КПД и фиксирующей способности выражения приобретают вид:

$$\eta_c = \frac{\beta_1 g_n}{\beta_2 + \beta_1 g_n} \quad \text{и} \quad S = \frac{1}{1 + g_0} = \frac{\beta_2}{\beta_2 + \beta_1 g_n}.$$

Если волновое сопротивление волновода выбрать таким чтобы $g_{\mu} = 1$, то предыдущее выражение приобретает вид:

$$\eta_c = \frac{\beta_1}{\beta_2 + \beta_1} \text{ и } S = \frac{\beta_2}{\beta_2 + \beta_1}.$$

Из этого вытекает, что КПД зависит больше от связи с волноводной нагрузкой при $\beta_2 = \text{const}$, а стабилизация улучшается при увеличении связи с диодной секцией ($\beta_2 \gg \beta_1$).

Выводы

1. Включением антипаразитной нагрузки обеспечивается устойчивая работа схемы при любых дестабилизирующих воздействиях.

2. Схема может работать с любыми диодами, в том числе и с теми, у которых активная проводимость диода меньше проводимости нагрузки.

3. Потери мощности функционально связаны с величиной стабилизации и заметно возрастают при увеличении последней.

4. Переход с волноводной диодной камеры на коаксиальную в этой конструкции увеличивает надежность перестройки генератора в широком диапазоне частот из-за понижения добротности резонансных колебаний в цепи активного элемента.

5. Улучшение термостабильности достигается применением в качестве материала суперинвара 32 НКД или инвара 36 Н для резонатора.

Одновременно возникает проблема с теплоотводом от диода, но она решается применением составного корпуса.

Литература

1. Выровой С.И. Сравнение одноконтурных схем стабилизации генераторов на активных двухполюсниках / С.И. Выровой, С.Н. Гуменный, Ю.А. Цвирко // Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ. – 1976. – №3. – С. 47-58.

2. Лукомский В.П. Измерения параметров эквивалентной схемы корпуса СВЧ диода в миллиметровом диапазоне длин волн / В.П. Лукомский, Е.И. Олейник // Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ. – 1978. – №5. – С. 52-59.

Автори статті

Зенів Ірина Онуфріївна – старший викладач кафедри телекомунікаційних технологій, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна. Тел. +380 50 200 55 05. E-mail: zenechka@ukr.net

Крилов Володимир Михайлович – старший викладач кафедри телекомунікаційних систем, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна. Тел.+380 63 677 95 51. E-mail: krulov94@ukr.net

Authors of the article

Zeniv Iryna Onufriyivna – senior teacher Department of Telecommunications technology, State university of telecommunications, Kyiv, Ukraine. Tel. +380 50 231 22 32. E-mail: zenechka@ukr.net.

Krylov Volodymyr Mychaylovych – senior teacher Department of Telecommunications technology, State university of telecommunications, Kyiv, Ukraine, Тел.+38 063 677 95 51, E-mail: krulov94@ukr.net.

Дата надходження в редакцію: 03.01.2016 р.

Рецензент: д.т.н., проф. В.А. Дружинін