

## ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.373.5

ШУМОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ,  
СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ ДИСПЕРСИОННЫМ РЕЗОНАТОРОМ

А.Я. БЕЛЬСКИЙ, А.В. ВОРОШЕНЬ, А.В. ГУСИНСКИЙ, А.Ю. ЯРМОЛИЧ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь**Поступила в редакцию 15 ноября 2007*

Проводится расчет фиксирующей способности колебательной системы генераторов сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн. Учитывается влияние диссипативных потерь в стенках резонатора. Приводится выражение для источника шумового тока, позволяющее оценить уровень амплитудных и частотных (фазовых) шумов генераторов.

*Ключевые слова:* СВЧ генераторы, флуктуационные параметры, источники шумов, шумовые характеристики.

## Введение

Метод стабилизации частоты СВЧ генераторов с помощью дисперсионных резонаторов, предложенный в [1], является достаточно простым и эффективным. При теоретических расчетах характеристик и параметров генераторов, выполненных на основе отрезка волновода, обычно пренебрегают рядом факторов, которые не особенно существенны в случае работы в области малой дисперсии ( $f_{кр}/f=0,5\div 0,8$ ). Однако при более точном анализе параметров стабильных генераторов [1, 2] на частотах ( $f_{кр}/f=0,80\div 0,99$ ) необходимо уже учитывать потери затухания в дисперсионном резонаторе, которые определенным образом влияют на выполнение условий баланса фаз и амплитуд и на уровень флуктуаций частоты, особенно в миллиметровом диапазоне длин волн. В данной работе рассматриваются генераторы, выполненные на основе диодов Ганна.

## Теоретический анализ

Кратковременная нестабильность частоты генератора может быть оценена как [1]

$$\Delta\omega = \frac{i_{ш_1} \partial G_{\partial} / \partial U - i_{ш_2(t)} \partial B_{\partial} / \partial U}{U \cdot \partial G_{\partial} / \partial U \cdot \partial B_s / \partial \omega}. \quad (1)$$

Амплитудные флуктуации рассчитываются как:

$$\Delta U = \frac{i_{ш_1}(t)}{U \partial G_{\partial} / \partial U}. \quad (2)$$

В уравнениях (1), (2):  $\Delta\omega$  — величина мгновенного отклонения частоты;  $\Delta U$  — величина мгновенного отклонения амплитуды;  $i_{u_1 t}$ ,  $i_{u_2 t}$  — квадратурная и синфазная компоненты источника шумового тока;  $U$  — амплитуда колебаний первой гармоники;  $\partial G_\rho / \partial U$  и  $\partial B_\rho / \partial U$  — производные по амплитуде активной и реактивной составляющих проводимости диода;  $\partial B_s / \partial \omega$  — производная по частоте реактивной составляющей проводимости генератора, определяющая крутизну  $K(F)$  фазочастотной характеристики колебательной системы генератора.

Уровни компонент источника шумового тока и величин производных без учета диссипативных потерь определялись в работах [1,3]. Для учета потерь затухания в резонансном контуре воспользуемся выражением для входной проводимости прямоугольного волновода, приведенным, например, в работе [4]:

$$Y_{ex} = G_s \operatorname{cth} \gamma l, \quad (3)$$

где  $G_s = G_o \sqrt{1-n^2}$  — проводимость согласованного волновода;  $G_o = a / 240\pi \cdot b$ ,  $a$  — ширина,  $b$  — высот волновода;  $n = f_{кр} / f$ ;  $f_{кр}$  — критическая частота волновода;  $f$  — рабочая частота;  $\gamma = \alpha + j\beta$  — комплексный коэффициент распространения;  $\alpha$  — коэффициент ослабления;  $\beta$  — коэффициент фазы;  $l$  — длина резонатора.

Учитывая, что

$$\operatorname{cth}(\alpha l + j\beta l) = \frac{1 - j \operatorname{cth} \alpha l \operatorname{ctg} \beta l}{\operatorname{cth} \alpha l - j \operatorname{ctg} \beta l} \quad (4)$$

и  $\operatorname{cth} \alpha l \approx 1 / \alpha l$  в первом приближении получим

$$Y_{ex} = G_s \left( \frac{\alpha l (1 + \operatorname{ctg}^2 \beta l)}{1 + (\alpha l \operatorname{ctg} \beta l)^2} - j \frac{\operatorname{ctg} \beta l}{1 + (\alpha l \operatorname{ctg} \beta l)^2} \right) \quad (5)$$

Разделяя активную и реактивную составляющие входной проводимости, можно записать

$$G_{ex} = G_s \frac{\alpha l (1 + \operatorname{ctg}^2 \beta l)}{1 + (\alpha l \operatorname{ctg} \beta l)^2} \quad (6)$$

$$B_{ex} = -G_s \frac{\operatorname{ctg} \beta l}{1 + (\alpha l \operatorname{ctg} \beta l)^2} \quad (7)$$

Коэффициент ослабления для основного типа волны  $H_{10}$  равен:

$$\alpha = \frac{\sqrt{\frac{\omega \epsilon_o}{2\sigma_{cm}} \left(1 + 2 \frac{b}{a} n^2\right)}}{b \sqrt{1-n^2}}, \quad (8)$$

где  $\epsilon_o$  — электрическая постоянная;  $\delta_{ст}$  — удельная проводимость стенок резонатора.

Запишем условия баланса фаз и амплитуд:

$$B_\rho + B_{вх} = 0, \quad (9)$$

$$G_\rho + G_{вх} = 0, \quad (10)$$

где  $B_\rho$  и  $G_\rho$  — реактивная и активная составляющие проводимости диода.

Определяем, используя выражения (6, 7), производную  $\partial B_{ex} / \partial \omega$ :

$$\frac{\partial B_{\text{вх}}}{\partial \omega} \approx \frac{G_{\text{вх}} l}{c} \frac{\text{ctg}^2 \beta l}{1 + \alpha \text{ctg} \beta l}, \quad (11)$$

где  $c$  — скорость света.

Будем учитывать в расчетах тот факт, что  $\text{ctg}^2 \beta l \gg 1$  и найдем его величину из условия (9):

$$\text{ctg} \beta l_{1,2} = \frac{G_s \mp \sqrt{G_s^2 - (2B_0 \alpha l)^2}}{2B_0 (\alpha l)^2}. \quad (12)$$

Анализ выражения (12) показал, что возможна двухчастотная генерация при условии, если  $2B_0 \alpha l < G_s$ , срыв колебаний при  $(2B_0 \alpha l)^2 > G_s^2$  и одночастотная генерация, если  $G_s = 2B_0 \alpha l$ . В случае одночастотной генерации приходим к выражению

$$\text{ctg} \beta l = G_s / 2B_0 (\alpha l)^2, \quad (13)$$

откуда получим

$$\text{ctg} \beta l = 1 / \alpha l. \quad (14)$$

Без учета потерь ( $\alpha=0$ ) производная, определяющая фиксирующую способность колебательной системы, может быть представлена выражением [1]:

$$\frac{\partial B_s}{\partial \omega} \approx \frac{G_o l}{c} (\text{ctg}^2 \beta l + 1), \quad (15)$$

где  $\text{ctg} \beta l = B_0 / G_s$ .

Результаты вычисления производных без учета и с учетом потерь затухания для генераторов сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн приведены на рис. 1, 2 соответственно.

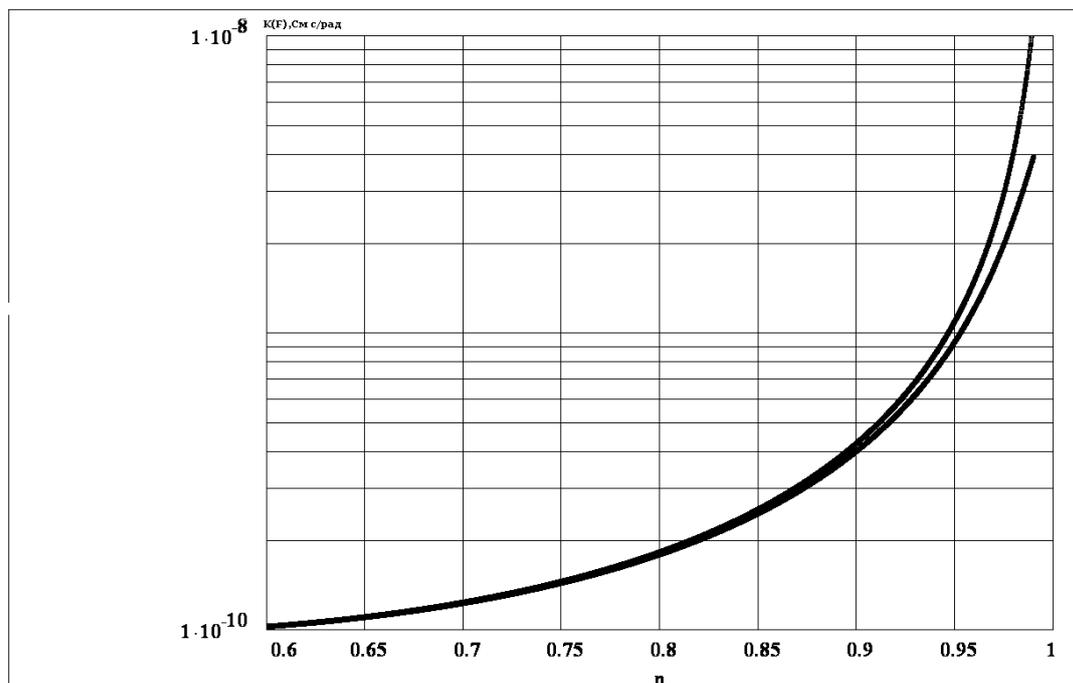


Рис. 1. Зависимость производной  $\partial B_{\text{вх}}/\partial \omega = K(F)$  от отношения  $f_{\text{ср}}/f$  без учета и с учетом потерь затухания в сантиметровом диапазоне. Верхняя кривая  $\alpha=0$ , нижняя —  $\alpha \neq 0$

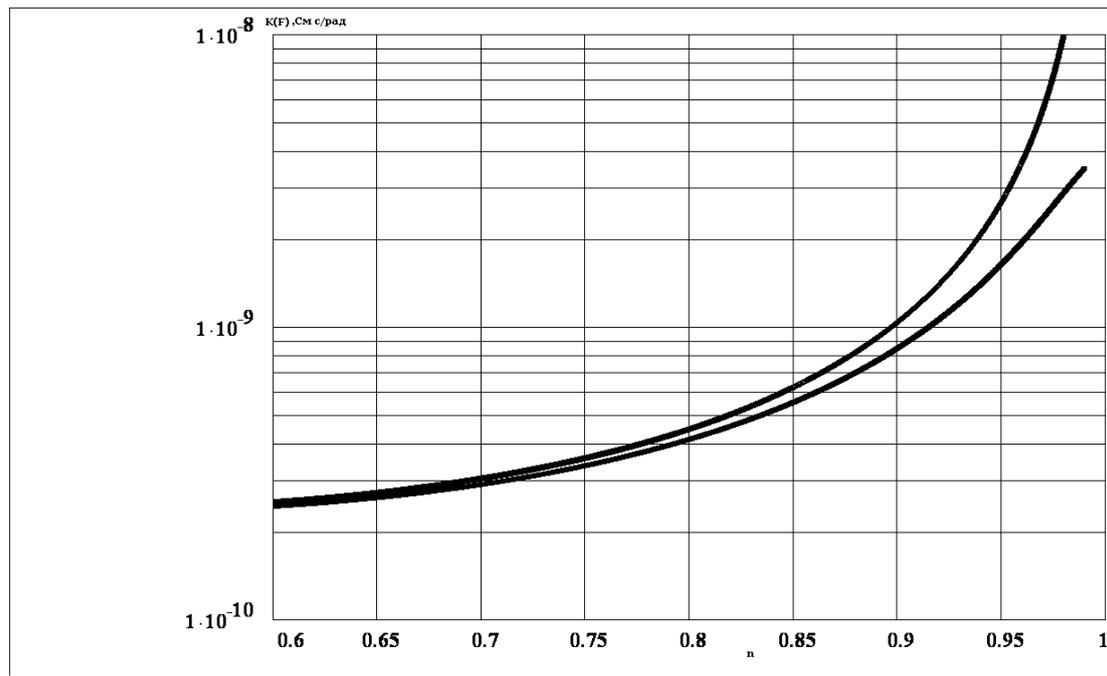


Рис. 2 Зависимость производной  $\partial B_{\text{вх}}/\partial\omega=K(F)$  от отношения  $f_{\text{кп}}/f$  без учета и с учетом потерь затухания в миллиметровом диапазоне. Верхняя кривая  $\alpha=0$ , нижняя —  $\alpha\neq 0$

Для определения уровня флуктуаций частоты и амплитуды генератора используем следующую математическую модель источника шумового тока [3]:

$$\overline{i_{\text{ш}}^2}(F) = 2gI_o^\gamma(1 + (F_s / F_{\text{ш}})^\alpha)\Delta F, \quad (16)$$

где  $\overline{i_{\text{ш}}^2}$  — среднеквадратическая величина шумового тока источника;  $g$  — заряд электрона;  $I_o$  — величина среднего тока диода;  $\gamma$  — показатель степени, учитывающий качество структуры диода;  $\alpha$  — показатель степени, учитывающий крутизну наклона спектральной характеристики шума и связанный с состоянием поверхности полупроводника;  $\Delta F$  — полоса частот анализа шумов;  $F_s$  — частота среза, т.е. частота, на которой уровень шума на 3 дБ выше величины равномерного участка спектра, т.е. "белого" шума;  $F_{\text{ш}}$  — частота исследуемых шумов.

Относительная спектральная плотность мощности частотных флуктуаций будет равна

$$S_{F(\text{ЧМ})} = 10\lg \frac{\Delta f^2}{2F_{\text{ш}}^2 \Delta F}, \quad (17)$$

амплитудных:

$$S_{F(\text{АМ})} = 10\lg \frac{\Delta U^2}{2U^2 \Delta F}, \quad (18)$$

или, учитывая (2), получим:

$$S_{F(\text{АМ})} = 10\lg \frac{i_{\text{ш}}^2(F)}{2U^4 (\partial G_o / \partial U)^2 \Delta F}. \quad (19)$$

Расчет флуктуаций проводился при следующих данных:  $I_o=0,25$  А;  $\gamma=0,95$ ;  $\alpha=1,2$ ;  $F_s=10^4$  Гц;  $U=7,5$  В;  $\partial B_{\text{вх}}/\partial\omega=1,7\cdot 10^{-9}$  См·с/рад;  $\partial G_o / \partial U = 0,01$  См/В;  $n=0,97$ , для генератора сантиметрового диапазона.  $I_o=0,7$  А;  $F_s=1,5\cdot 10^5$  Гц;  $U=3,8$  В;  $\partial B_{\text{вх}}/\partial\omega=10^{-9}$  См·с/рад;  $\partial G_o / \partial U = 0,07$  См/В;  $n=0,92$ ;  $\gamma=0,95$ ;  $\alpha=1,2$  для генератора миллиметрового диапазона длин

волн. Результаты расчета относительных спектральных плотностей мощности частотных и амплитудных шумов генераторов сантиметрового и миллиметрового диапазонов приведены на рис. 3, 4 соответственно.

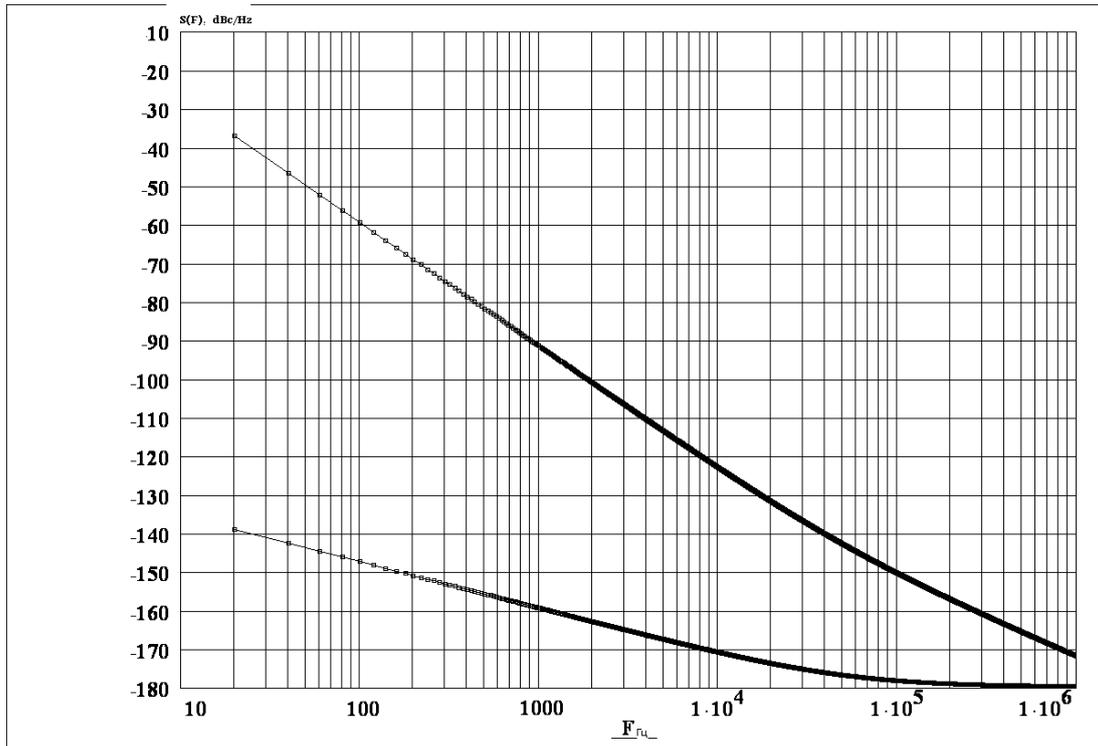


Рис. 3. Шумовые характеристики генератора сантиметрового диапазона: верхняя кривая — ЧМ-шум, нижняя — АМ-шум

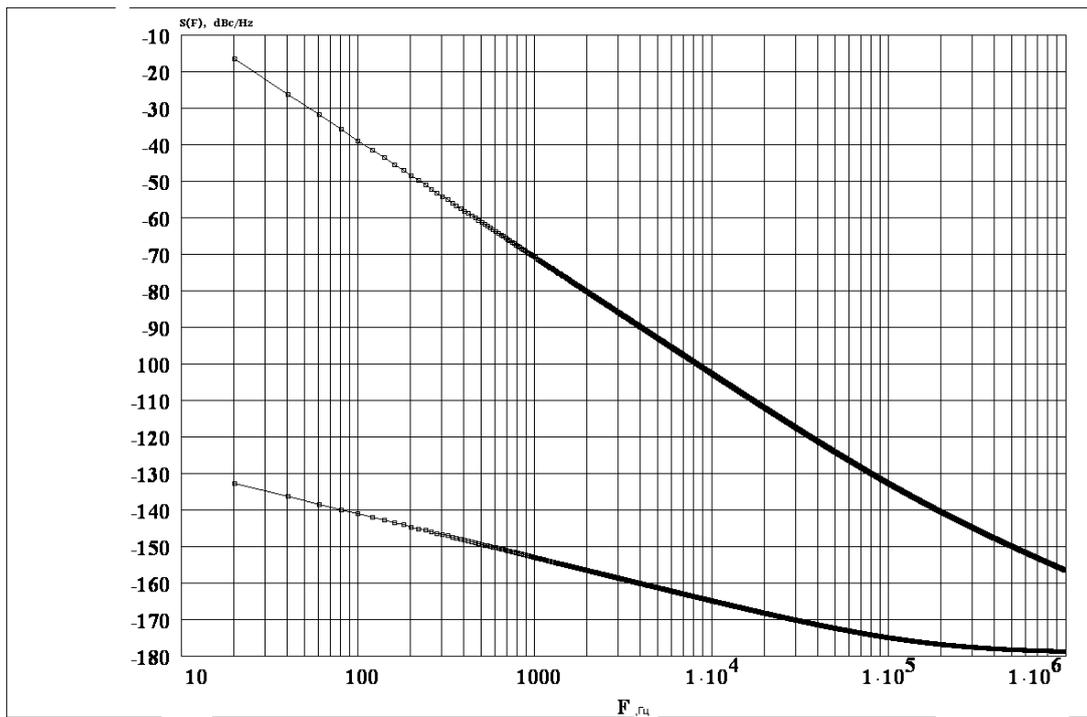


Рис. 4. Шумовые характеристики генератора миллиметрового диапазона: верхняя кривая — ЧМ-шум, нижняя — АМ-шум

Расчет шумовых характеристик проводился в среде Mathcad.

## Экспериментальная часть

Шумовые характеристики генераторов исследовались с помощью специального прибора. Амплитудные шумы измерялись методом непосредственного детектирования, частотные — интерференционным методом [5]. Значения уровня измеренных амплитудных шумов были несколько выше рассчитанных, по-видимому, вследствие того, что метод непосредственного детектирования не позволяет точно учесть уровень собственных шумов аппаратуры. Измеренные уровни частотных шумов были более близки к теоретическим.

На рис. 5 представлен спектр генератора сантиметрового диапазона, а на рис. 6 — его фазовые шумы, измеренные с помощью специального анализатора спектра. Амплитудные шумы этот прибор не позволяет измерять.

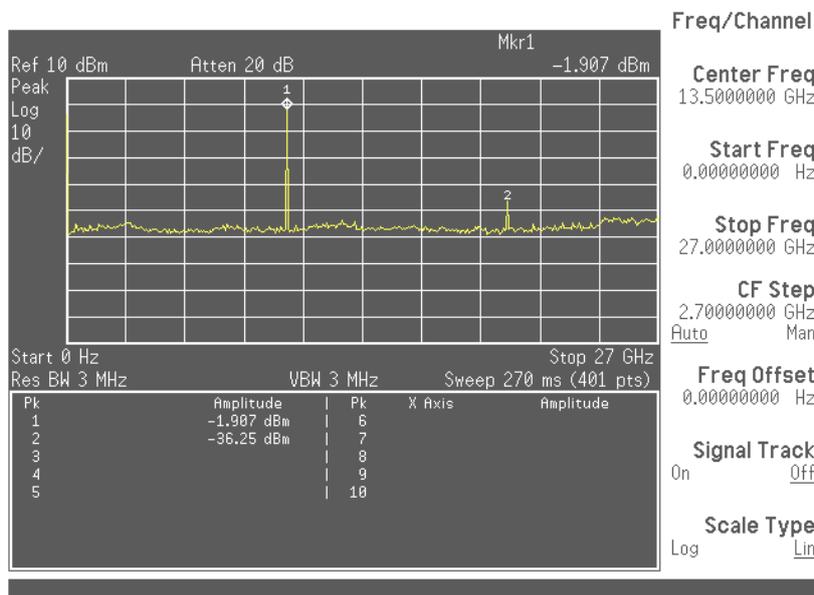


Рис. 5. Спектральные характеристики генератора

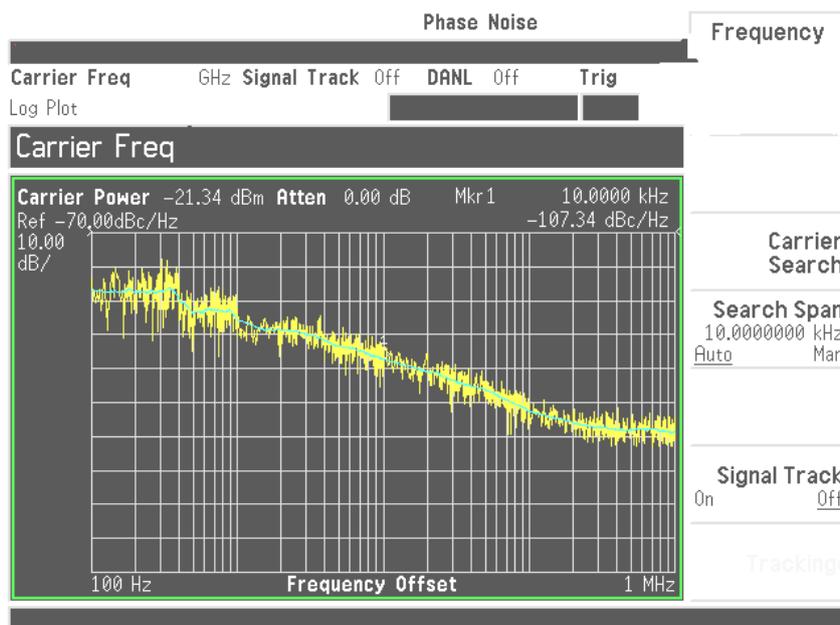


Рис. 6. Фазовые шумы ( $n=0,88$ )

## Заклучение

Проведен расчет фиксирующей способности колебательных систем ГДГ на основе дисперсионных резонаторов, определены уровни частотных (фазовых) и амплитудных шумов. Учет диссипативных потерь в дисперсионном резонаторе при расчете шумовых характеристик показал, что их влияние незначительно в сантиметровом диапазоне длин волн (несколько децибел) и более значительно в миллиметровом диапазоне (до 5÷6 дБ). Низкий уровень шумов и простота конструкции позволяют использовать такие генераторы в качестве высокочувствительных СВЧ датчиков, гетеродинов радиоприемных устройств, задающих генераторов РЛС и других устройствах, как в сантиметровом, так и миллиметровом диапазонах длин волн.

## NOISE CHARACTERISTICS OF SOLID-STATE OSCILLATORS, STABILIZED WITH A DISPERSION RESONATOR

A.YA. BELSKY, A.V. VOROSHEN, A.V. GUSINSKI, A.U. YARMOLICH

### Abstract

The calculation of the oscillating system fixing ability of oscillators in centimeter and millimeter wave ranges is carried out. The impact of dissipative loss in the resonator sides is taken into consideration. The expression for a noise current source is presented, enabling to evaluate the amplitude and phase noise levels in the oscillators.

### Литература

1. *Муравьев В.В., Савельев В.Я., Бельский А.Я.* Изв. вузов СССР. Радиоэлектроника. 1974. № 8. С. 88–90.
2. *Котиков В.И., Бариков В.А., Кузнецов О.В.* Радиотехника, 1977. № 7.
3. *Бельский А.Я., Зацепин Е.Н.* Изв. АН БССР, Сер. физ.-техн. наук, 1985, № 4. С. 107–110.
4. *Баскаков С.И.* Радиотехнические цепи с распределенными параметрами. М., 1980.
5. *Бельский А.Я., Гусинский А.В., Дзисяк А.Б., Кострикин А.М.* // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2005. № 2. С. 53–59.