

# ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЧ ГЕНЕРАТОРОВ ПРИ МОДУЛЯЦИИ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ

Носков В. Я., Игнатков К. А.  
Уральский федеральный университет (УрФУ)  
им. Первого президента России Б. Н. Ельцина  
Екатеринбург, Россия  
e-mail: noskov@oko-ek.ru

**Аннотация** — Представлены результаты анализа модуляционных характеристик СВЧ генераторов, модулируемых по изменению модуля коэффициента отражения. Получены выражения и построены графики частотных зависимостей коэффициентов модуляции по изменению амплитуды, частоты и сигнала автодетектирования СВЧ генератора. На основе результатов численных расчётов характеристик показаны особенности их поведения в зависимости от частоты модуляции.

## I. Введение

Для исследования динамических свойств генераторов обычно используется метод модуляционных характеристик, экспериментальное получение которых значительно проще, чем снятие автодинных характеристик [1, 2]. Согласно этому методу при фиксированном значении модулирующего параметра (модуля коэффициента отражения) снимается частотная зависимость модуляционной способности генератора при высоких значениях частоты модуляции, из которой далее находится постоянная времени автодинного отклика. При обосновании этого метода в работе [1] установлено соотношение между коэффициентами автодинного усиления и амплитудной модуляционной способностью неизохронного генератора.

Ниже на основе полученных в работе [3] результатов исследований представлены новые результаты анализа более общего случая модуляции автогенератора путём вариации модуля коэффициента отражения от нагрузки. При этом рассмотрены как неизохронные, так и неизодромные [4] генераторы и установлены соотношения между их автодинными и модуляционными параметрами и характеристиками.

## II. Динамические модуляционные характеристики и их анализ

Постоянная времени автодинного отклика обычно определяется по модуляционной характеристике СВЧ-генератора [1,2]. Эта характеристика снимается на обычном экспериментальном стенде [5], в котором электромеханический имитатор доплеровского сигнала заменяется рпн-диодным модулятором, работающим на отражение (см. рис. 16, [1]). При этом рабочая точка на характеристике рпн-диода выбирается в середине линейного участка прямого смещения. Данные условия обеспечивают при подаче на рпн-диод гармонического сигнала малой амплитуды с частотой  $\Omega_m$  изменение коэффициента отражения по закону:

$$\Gamma(t) = \Gamma_0(1 + m_r \sin \Omega_m t), \quad (1)$$

где  $\Gamma_0$  — среднее значение коэффициента отражения,  $m_r$  — его индекс модуляции.

Решение системы (4) – (6) работы [3] с учётом (1) для этого случая даёт следующие выражения для рассматриваемых здесь компонентов автодинного отклика:

$$a_1(\delta_0, t) = \Gamma_0 K_a \cos(\delta_0 - \psi_1) + \tilde{a}_1(t), \quad (2)$$

$$\chi(\delta_0, t) = -\Gamma_0 L_a \sin(\delta_0 + \theta) + \tilde{\chi}(t), \quad (3)$$

$$i_0(\delta_0, t) = \Gamma_0 K_0 \cos(\delta_0 - \psi_0) + \tilde{i}_0(t), \quad (4)$$

где  $\tilde{a}_1(t)$ ,  $\tilde{\chi}(t)$ ,  $\tilde{i}_0(t)$  — переменные составляющие, отклика генератора, обусловленные процессом его модуляции:

$$\tilde{a}_1(t) = \Gamma_0 m_r K_a K_{1r} \cos(\delta_0 - \psi_1) \cos(\Omega_m t - \psi_{1r}), \quad (5)$$

$$\tilde{\chi}(t) = -\Gamma_0 m_r L_a \sin(\delta_0 + \theta) L_r \cos(\Omega_m t - \theta_{r\Omega}), \quad (6)$$

$$\tilde{i}_0(t) = \Gamma_0 m_r K_0 \cos(\delta_0 - \psi_0) K_{0r} \cos(\Omega_m t - \psi_{0r}); \quad (7)$$

$K_{1r}$ ,  $L_r$ ,  $K_{0r}$  — нормированные относительно собственных значений при  $\Omega_m = 0$  частотно-зависимые составляющие коэффициентов передачи модуляции в изменения амплитуды и частоты колебаний, а также в цепь смещения АЭ (сигнал автодетектирования):

$$K_{1r} = 1/\sqrt{1 + \Omega_H^2}, \quad (8)$$

$$L_r = \frac{\gamma \cos \delta_0 + [1 + (1 - \gamma\rho)\Omega_H^2] \sin \delta_0}{(\gamma \cos \delta_0 + \sin \delta_0)(1 + \Omega_H^2) \cos \theta_{r\Omega}}, \quad (9)$$

$K_{0r} =$

$$= \frac{\cos \delta_0 + \rho \sin \delta_0 - \kappa_{чд} \{ \gamma \cos \delta_0 + [1 + (1 - \gamma\rho)\Omega_H^2] \sin \delta_0 \}}{(1 + \Omega_H^2) \sqrt{(1 - \kappa_{чд} \gamma)^2 + (\rho - \kappa_{чд})^2} \cos(\delta_0 - \psi_0) \cos \psi_{0\Omega}} \quad (10)$$

$\psi_{1r}$ ,  $\theta_r$ ,  $\psi_{0r}$  — частотно-зависимые углы фазового смещения модуляционных изменений амплитуды и частоты колебаний генератора, а также сигнала автодетектирования соответственно:

$$\psi_{1r} = \arctg \Omega_H, \quad (11)$$

$$\theta_r = \arctg \frac{\gamma \Omega_H (\cos \delta_0 + \rho \sin \delta_0)}{\gamma \cos \delta_0 + [1 + (1 - \gamma\rho)\Omega_H^2] \sin \delta_0}, \quad (12)$$

$\psi_{0r} =$

$$= \arctg \frac{\Omega_H (1 - \gamma \kappa_{чд}) (\cos \delta_0 + \rho \sin \delta_0)}{\cos \delta_0 + \rho \sin \delta_0 - \kappa_{чд} \{ \gamma \cos \delta_0 + [1 + (1 - \gamma\rho)\Omega_H^2] \sin \delta_0 \}}; \quad (13)$$

$\Omega_H = \Omega_m T_a$  — нормированная частота модуляции.

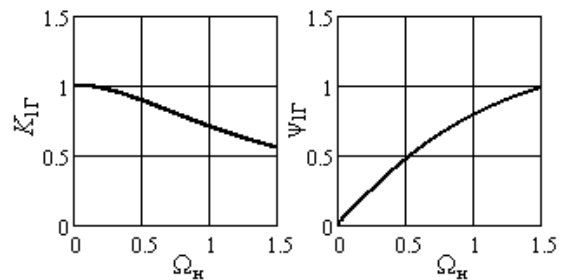


Рис. 1. Графики частотных зависимостей коэффициента  $K_{1r}$  и угла смещения  $\psi_{1r}$ .

Fig. 1. Diagrams of frequency dependences of coefficient  $K_{1r}$  and shift angle  $\psi_{1r}$

На рис. 1 представлены результаты расчётов, выполненные по формулам (8) и (11), коэффициента  $K_{1r}$  и его фазовой характеристики  $\psi_{1r}$ . Из графика этого рисунка видно, что характеристика  $K_{1r}$  имеет простейший вид, подобный характеристике колеба-

тельного контура. Из сравнения кривых, представленных на рис. 1 и рис. 1 а работы [6] видно, что характеристики для модулей коэффициентов  $K_{1\Gamma}$  и  $K_{1\Omega}$  полностью совпадают. Отличаются на этих рисунках только их фазовые характеристики  $\psi_{1\Gamma}$  и  $\psi_{1\Omega}$ , причём последние имеют постоянные смещения фазы автодинного отклика, зависящие от внутренних свойств генератора, тогда как в случае модуляции коэффициента отражения такой зависимости нет. Граничное значение частоты по уровню 0,707 от максимального значения глубины модуляции здесь также определяется величиной постоянной времени автодинного отклика  $\Omega_{pr} = 1/T_a$  и связана с внутренними параметрами генератора соотношением (14) работы [6].

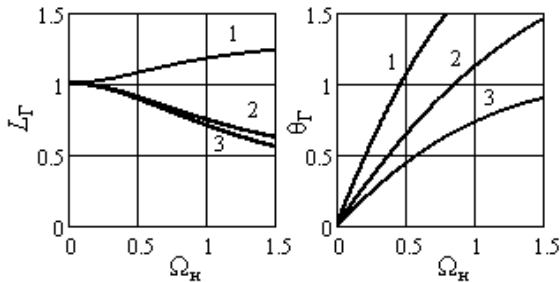


Рис. 2. Графики частотных зависимостей коэффициентов девиации частоты  $L_{\Gamma}$  и углов фазового смещения  $\theta_{\Gamma}$ .

Fig. 2. Diagrams of frequency dependences of frequency deviation ratio  $L_{\Gamma}$  and phase shift angle  $\theta_{\Gamma}$

В отличие от характеристик автодинной девиации частоты  $L_{\Omega}$  (см. рис. 1 б, [6]) характеристики частотной модуляции  $L_{\Gamma}$  при изменении коэффициента отражения  $\Gamma$  являются симметричными функциями частоты  $\Omega_H$ . Графики частотных зависимостей модуля  $L_{\Gamma} = L_{\Gamma}(\Omega_H)$  и фазы  $\theta_{\Gamma} = \theta_{\Gamma}(\Omega_H)$  представлены на рис. 2. Кривые на этих графиках получены на основании (9) и (12) при вариациях фазы  $\delta_0$  коэффициента отражения:  $\delta_0 = \text{arctg} \rho - 0,3$  (кр. 1);  $\delta_0 = \text{arctg} \rho$  (кр. 2);  $\delta_0 = \text{arctg} \rho + 0,3$  (кр. 3). Из графиков видно, что с увеличением частоты модуляции  $\Omega_H$  девиация частоты может при определённых значениях  $\delta_0$  (а также  $\gamma$ ) увеличиваться (кр. 1) или уменьшаться (кр. 3). Лишь в случае изохронного генератора, у которого  $\gamma = 0$ , частотная зависимость  $L_{\Gamma}$  и  $\theta_{\Gamma}$  отсутствует.

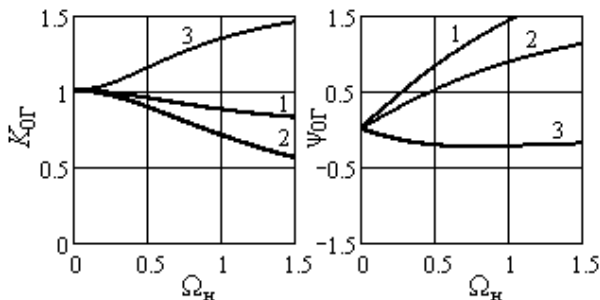


Рис. 3. Графики частотных зависимостей коэффициентов  $K_{OG}$  и угла смещения  $\psi_{OG}$ .

Fig. 3. Diagrams of frequency dependences of coefficient  $K_{OG}$  and shift angle  $\psi_{OG}$

На рис. 3 представлены графики коэффициента модуляции сигнала автодетектирования  $K_{OG}$  и его фазы  $\psi_{OG}$  от частоты  $\Omega_H$  модуляции, рассчитанные согласно (10) и (13) при  $\gamma = 1,2$ ,  $k_{зд} = 0,4$  и различных фазах  $\delta_0$ :  $\delta_0 = \text{arctg} \rho - 0,8$  (кр. 1);  $\delta_0 = \text{arctg} \rho$  (кр. 2);  $\delta_0 = \text{arctg} \rho + 1,7$  (кр. 3). Из графиков видно, что здесь также при увеличении частоты  $\Omega_H$  величина

модуляции сигнала автодетектирования может, как увеличиваться при определённых значениях фазы  $\delta_0$  (кр. 3), так и уменьшаться (кр. 1 и 2). Причём, при отсутствии у генератора явления частотного детектирования ( $k_{зд} = 0$ ) вид характеристик  $K_{OG}$  и  $\psi_{OG}$  полностью совпадает с характеристиками  $K_{1\Gamma}$  и  $\psi_{1\Gamma}$  (см. рис. 1 в, [6]).

### III. Заключение

Из анализа полученных характеристик модуляции СВЧ генератора изменением коэффициента отражения следует, что только характеристика модуляции амплитуды колебаний совпадает с амплитудной характеристикой автодина и может использоваться для определения постоянной времени автодинного отклика. Поведение остальных характеристик значительно зависит от внутренних параметров генератора и фазы коэффициента отражения, поэтому не могут использоваться для указанной цели.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в соответствии с постановлением Правительства №218 от 09.04.2010г.

### IV. Список литературы

- [1] Резонанс релаксационных колебаний в автодинных генераторах / Е. М. Гершензон, В. М. Калыгина, Б. И. Левит, Б. Н. Туманов // Известия вузов. Радиофизика. 1981. Т. 24. № 8. С. 1028—1034.
- [2] Гершензон Е. М., Левит Б. И., Туманов Б. Н. Автодинные и модуляционные характеристики инжекционных полупроводниковых лазеров // Известия вузов. Радиофизика. 1980. Т. 23, № 5. С. 533—541.
- [3] Носков В. Я., Игнатков К. А. Модель автодинного СВЧ генератора для определения его динамических свойств // 22-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2012): материалы конф. (Севастополь, 10—1412 сент. 2012 г.). Севастополь : Вебер, 2012.
- [4] Носков В. Я., Игнатков К. А., Смольский С. М. Амплитудно-частотные характеристики автодинных СВЧ генераторов // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. 2011. № 4 (511). С. 17—31.
- [5] Вотропин С. Д., Носков В. Я., Смольский С. М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Часть 2. Теоретические и экспериментальные исследования // Успехи современной радиоэлектроники. 2007. № 7. С. 3—33.
- [6] Носков В. Я., Игнатков К. А. Динамические автодинные характеристики СВЧ генераторов // 22-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2012): материалы конф. (Севастополь, 10—1412 сент. 2012 г.). Севастополь: Вебер, 2012.

## MICROWAVE OSCILLATORS CHARACTERISTICS IN CASE OF REFLECTION COEFFICIENT MODULATION

Noskov V. Ya., Ignatkov K. A.

Ural Federal University (UrFU) named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia  
e-mail: noskov@oko-ek.ru

**Abstract** — The results of analysis of microwave oscillator modulation characteristics modulated by reflection-coefficient modulus changes are presented. We derived expressions and plotted graphs of modulation rate frequency dependence based on changing the amplitude, frequency, and an autodetection signal of a microwave oscillator. Their behavior peculiarities, which depend on the modulation frequency, are based on the results of numerical calculations of the characteristics.