

# ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЧ ГЕНЕРАТОРОВ ПРИ МОДУЛЯЦИИ ПО ЦЕПИ ПИТАНИЯ

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 цепи питания активного элемента. 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 автодинных СВЧ генераторов обычно используется метод модуляционных характеристик [1, 2]. Согласно этому методу снимается частотная зависимость модуляционной способности генератора при изменении коэффициента отражения от нагрузки.

Известно также большое число работ, посвящённых исследованиям частотной зависимости модуляционной чувствительности генераторов на полупроводниковых СВЧ диодах при их модуляции по цепи питания (см., например, [3, 4]). При этом в известных нам работах вопрос о связи характеристик, полученных при модуляции генератора по цепи питания, и автодинных характеристик этого генератора не обсуждался.

Ниже на основе полученной в работе [5] математической модели СВЧ генератора выполнены исследования, восполняющие указанный пробел. При этом учтены также такие свойства СВЧ генераторов, как неизохронность и неизодромность [6].

## II. Характеристики СВЧ генераторов при их модуляции по цепи питания

Рассмотрим модуляционные характеристики генераторов при их модуляции по цепи питания. При этом проанализируем общий случай не развязанного генератора, на который одновременно воздействует отражённое излучение. В этом случае необходимо решение системы уравнений (4) – (5) работы [5], полагая в ней  $a_0 = e_m \cos \Omega_m t$ , где  $e_m = E_m/E_0$  – относительная амплитуда модуляции. В результате решения этой системы получим выражения, по форме совпадающие с (2) – (4) работы [7]. В них первые слагаемые полностью соответствуют этим выражениям, а вторые, обусловленные модуляцией, имеют вид:

$$\tilde{a}_1(t) = -e_m m_{ам} M_{ам} \cos[\Omega_m t - \psi_{п}], \quad (1)$$

$$\tilde{\chi}(t) = -e_m m_{чм} M_{чм} \cos[\Omega_m t + \theta_{п}], \quad (2)$$

$$\tilde{b}(t) = e_m \alpha_{00} \cos \Omega_m t + e_m m_0 M_0 \cos[\Omega_m t + \psi_{оп}], \quad (3)$$

где  $m_{ам}$ ,  $m_{чм}$ ,  $m_0$  — коэффициенты модуляции амплитуды и частоты генерации, а также сигнала в цепи автодетектирования:  $m_{ам} = k_{ам}(1 - \mu r)/(1 - \gamma r)$ ,  $m_{чм} = \beta_{10}(1 - k_{чм})/Q_n$ ,  $m_0 = \alpha_{01} m_{ам} [1 + k_{чд} \mu r (1 - k_{чм})]$ ;  $M_{ам}$ ,  $M_{чм}$ ,  $M_0$  — нормированные относительно  $\Omega_m = 0$  частотно-зависимые составляющие коэффициентов передачи модуляции в изменения амплитуды и частоты колебаний, а также в цепь смещения АЭ (сигнал автодетектирования):

$$M_{ам} = 1/\sqrt{1 + \Omega_n^2}, \quad (4)$$

$$M_{чм} = \frac{\sqrt{(1 - k_{чм} + \Omega_n^2)^2 + k_{чм}^2 \Omega_n^2}}{(1 + \Omega_n^2)(1 - k_{чм})}, \quad (5)$$

$$M_{оп} = \frac{\sqrt{[1 + k_{чд} \mu r (1 - k_{чм} + \Omega_n^2)]^2 + (1 + k_{чд} \gamma)^2 \Omega_n^2}}{(1 + \Omega_n^2)[1 + k_{чд} \mu r (1 - k_{чм})]}; \quad (6)$$

$\psi_{п}$ ,  $\theta_{п}$ ,  $\psi_{оп}$  — частотно-зависимые углы фазового смещения модуляционных изменений амплитуды и частоты колебаний генератора, а также сигнала автодетектирования соответственно:

$$\psi_{п} = \arctg \Omega_n, \quad (7)$$

$$\theta_{п} = \arctg \frac{k_{чм} \Omega_n}{1 - k_{чм} + \Omega_n^2}, \quad (8)$$

$$\psi_{оп} = \arctg \frac{(1 + k_{чд} \gamma) \Omega_n}{1 + k_{чд} \mu r (1 - k_{чм} + \Omega_n^2)}; \quad (9)$$

$\Omega_n = \Omega_m \tau_a$  — нормированная частота модуляции;  $k_{ам} = \alpha_{10}/\alpha_{11}$  — коэффициент модуляции амплитуды колебаний;  $r = (1 - \gamma r)/(1 - \mu r)$  — коэффициент регенерации процесса модуляции за счёт внутренних «обратных связей» в генераторе;  $\mu = \beta_{10}/\alpha_{10}$  — коэффициент, характеризующий процесс «прямого» преобразования изменений смещения в изменения частоты колебаний;  $k_{чм} = k_{ам} \beta_{11}/\beta_{10}$  — коэффициент модуляции частоты колебаний, обусловленный неизохронностью генератора.

На рис. 1 представлены результаты расчётов, выполненных по формулам (4) и (7), частотных зависимостей нормированного коэффициента амплитудной модуляции  $M_{ам}$  и угла фазового смещения  $\psi_{п}$ . Данные характеристики полностью совпадают с аналогичными характеристиками относительной глубины модуляции амплитуды  $K_{1г}$  и её фазового сдвига  $\psi_{1г}$  для случая модуляции коэффициента отражения (см. рис. 1, [7]). При этом характеристика  $M_{ам}$  совпадает также с амплитудной характеристикой автодина (см. рис. 1 а, [8]).

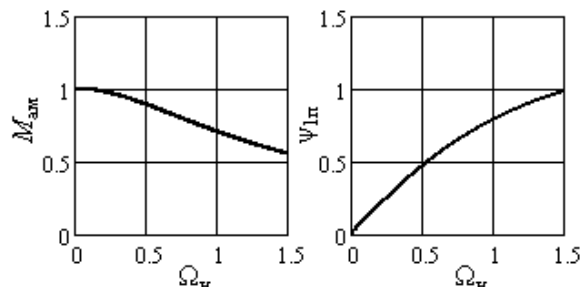


Рис. 1. Графики частотных зависимостей коэффициента  $M_{ам}$  и угла смещения  $\psi_{п}$ .

Fig. 1. Diagrams of frequency dependences of coefficient  $M_{ам}$  and shift angle  $\psi_{п}$ .

Характеристики коэффициентов  $M_{чм}$  частотной модуляции (см. рис. 2) по цепи питания также являются симметричными функциями частоты модуляции

$\Omega_n$ , как и в случае коэффициентов  $L_r$  частотной модуляции генератора изменением коэффициента отражения (см. рис. 2, [7]). Кривые на графиках рис. 2 получены при вариациях коэффициента частотной модуляции  $k_{чм}$ :  $k_{чм} = -0,4$  (кр. 1);  $k_{чм} = 0$  (кр. 2);  $k_{чм} = 0,4$  (кр. 3). Из графиков видно, что при положительных значениях коэффициента  $k_{чм}$  в характеристике  $M_{чм}$  с увеличением частоты модуляции наблюдается подъём (кр. 3), а при отрицательных значениях  $k_{чм}$  — завал (кр. 1). При этом поведение фазовых характеристик  $\theta_n$  при смене знака коэффициента  $k_{чм}$  также меняется на противоположное (кр. 1 и 3). Такая зависимость обусловлена преобразованием изменений амплитуды колебаний генератора в изменения его частоты вследствие его неизохронности ( $\beta_{11} = 0$ ). В случае изохронного генератора, у которого  $k_{чм} = 0$ , зависимости модуля  $M_{чм}$  и фазы  $\theta_n$  отсутствуют (кр. 2).

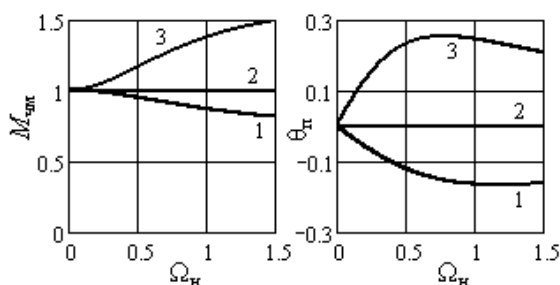


Рис. 2. Графики частотных зависимостей коэффициентов девиации частоты  $M_{чм}$  и углов смещения  $\theta_n$ .

Fig. 2. Diagrams of frequency dependences of frequency deviation ratio  $M_{чм}$  and shift angle  $\theta_n$

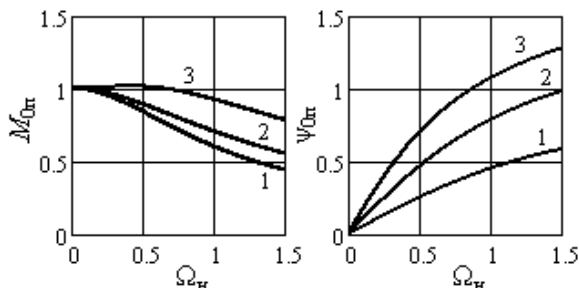


Рис. 3. Графики частотных зависимостей коэффициентов  $M_{он}$  и угла смещения  $\psi_{он}$ .

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

На рис. 3 представлены графики коэффициента модуляции сигнала автодетектирования  $M_{он}$  и его фазы  $\psi_{он}$  от частоты  $\Omega_n$  модуляции, рассчитанные согласно (6) и (9) при  $\mu = -0,5$ ;  $r = 0,5$  и различных значениях коэффициента частотного детектирования  $k_{чд}$ :  $k_{чд} = -0,4$  (кр. 1);  $k_{чд} = 0$  (кр. 2);  $k_{чд} = 0,4$  (кр. 3). Из представленных на рис. 3 графиков видно, что амплитуда изменений сигнала автодетектирования  $M_{он}$  у СВЧ-генераторов, модулируемых по цепи питания, с увеличением частоты  $\Omega_n$  модуляции может при определённых положительных значениях коэффициента частотного детектирования  $k_{чд}$  возрастать в некотором диапазоне частот (кр. 3). Однако основная тенденция этих характеристик — уменьшение глубины модуляции с увеличением частоты  $\Omega_n$  (кр. 1 и 2). Причём, при отсутствии у генератора явления частотного детектирования ( $k_{чд} = 0$ ) вид характеристик  $M_{он}$  и  $\psi_{он}$  полностью совпадает с характеристиками  $M_{1Г}$  и  $\psi_{1Г}$  (см. рис. 1, [7]) и  $M_{ам}$  и  $\psi_{1п}$  (см. рис. 1).

### III. Заключение

Таким образом, из результатов проведенного анализа модуляционных характеристик СВЧ генераторов, модулируемых по цепи питания, следует, что амплитудной характеристикой автодина совпадает, как и в случае модуляции генератора путём изменения коэффициента отражения, только характеристика модуляции амплитуды колебаний. Поведение остальных характеристик в значительной степени зависит от внутренних параметров и режима колебаний генератора, 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] Martin B., Hobson G. S. High-speed phase and amplitude modulation of Gunn oscillators // Electronics Letters. 1970. Vol. 6. No. 8. P. 244—246.
- [4] Дубровский В. Н., Карасёв А. С. Частотная зависимость дифференциальной проводимости диодов Ганна // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1985. № 8 (380). С. 20—23.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Носков В. Я., Игнатков К. А. Характеристики СВЧ генераторов при модуляции коэффициента отражения // 22-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2012): материалы конф. (Севастополь, 10—1412 сент. 2012 г.). Севастополь : Вебер, 2012.
- [8] Носков В. Я., Игнатков К. А. Динамические автодинные характеристики СВЧ генераторов // Там же.

### MICROWAVE OSCILLATOR CHARACTERISTICS IN CASE OF MODULATION THROUGH SUPPLY CIRCUIT

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, which are modulated through the power supply chain of the active element, are presented. Expressions and plotted graphs of modulation rate frequency response depending on the change of microwave generator amplitude, frequency, and auto-detection signal, are derived. Their behavior peculiarities depending on the modulation frequency are introduced on the basis of the results of numerical calculations of the characteristics.