

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ УРОВНЕЙ ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ТРАНЗИСТОРНЫХ АВТОГЕНЕРАТОРОВ

Титович Н. А.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, ул. П. Бровки, 6, 220013, Республика Беларусь
тел.: 8-10-375-17 293 88 11, e-mail: tna@dems.by

Аннотация — С помощью метода медленно меняющихся амплитуд проведен расчет уровней гармонических составляющих СВЧ транзисторного автогенератора. Показано, что их значения определяются не только элементами схемы генератора и амплитудой основного колебания, но и в значительной степени нелинейностью характеристики в области рабочей точки. Для уменьшения уровней гармонических составляющих при настройке генераторов в качестве критерия оценки нелинейности характеристики предложено использовать изменение величины постоянной составляющей выходного тока транзистора при воздействии СВЧ сигнала.

I. Основная часть

При расчете уровней гармонических составляющих удобно пользоваться методом медленно меняющихся амплитуд, который имеет достаточно высокую точность и позволяет понизить порядок нелинейного дифференциального уравнения, описывающего колебательный процесс в автогенераторе (АГ), до второго [1]. Анализ схем транзисторных АГ ВЧ и СВЧ диапазона показал, что колебания в них можно описать уравнением с малым положительным параметром в правой части

$$\frac{d^2 u}{d\tau^2} + u = \varepsilon \{ Gu - [Df'(u) + 1] \frac{du}{d\tau} \}, \quad (1)$$

где u — переменное напряжение между эмиттером и базой; $\tau = \omega t$, $\omega = 2\pi f$; f — частота колебаний;

Q — добротность контура; $D = \alpha K L_k / [r C_k (1 + K)]$;

α — коэффициент передачи транзистора по току в схеме с общей базой;

$r = L_k / (C_k R_k)$; C_k , R_k и L_k — включенные параллельно эквивалентные емкость, сопротивление и индуктивность колебательного контура между коллектором и базой [2]; K — коэффициент обратной связи АГ;

$G = \delta / d + C_1 / [d C_k / (1 + K)]$ — для емкостной и

$G = \delta / d + L_k / [d L_1 / (1 + K)]$ — для индуктивной

трехточечной схемы;

$\delta = 1 - \omega_0^2 / \omega^2 \ll 1$ — относительная расстройка контура АГ;

$\omega = 1 / \sqrt{L_k C_k}$ — резонансная частота контура

между коллектором и базой; L_1 и C_1 — эквивалентные индуктивность и емкость между коллектором и эмиттером; $f(u)$ — нелинейная зависимость тока активного элемента от входного напряжения.

Для АГ с индуктивной обратной связью на поле-вом транзисторе $G = \delta / d$, $D = -M / (r C_k)$, где M — взаимдуктивность цепи обратной связи [2].

Достоверность расчетной оценки во многом определяется точностью аппроксимации зависимости тока

коллектора (стока) от уровня входного напряжения (между базой и эмиттером или затвором и истоком). Разработаны машинные программы, которые позволяют достаточно точно описать эту зависимость для любого активного элемента степенным полиномом вида

$$f(u) = \sum_{n=0}^k (\alpha_n U^n),$$

либо экспоненциальной функцией

$$f(u) = I e^{bu},$$

где α_n , I и b — коэффициенты аппроксимации.

Решение уравнения (1) с использованием методики, описанной в [1], и данных видов аппроксимации позволяет получить выражения для уровней гармонических составляющих, которые в общем виде можно записать как

$$a_n = \frac{\varepsilon D n \alpha_n 2^{1-n}}{n^2 - 1}, \quad (2)$$

$$a_n = \frac{2 I \varepsilon D n J_n(ba)}{n^2 - 1}, \quad (3)$$

где a — амплитуда основного колебания АГ;

$J_n(ba)$ — функция Бесселя n -го порядка от аргу-

мента ba ; $n = 2, 3, \dots$

Из выражений (2) и (3) следует, что уровни гармоник определяются значениями затухания колебательного контура $d = \varepsilon / Q$, которое в соответствии с (1) должно быть $\ll 1$, параметрами схемы АГ, что выражается коэффициентом D , амплитудой основного колебания a , а также в значительной степени зависят от положения рабочей точки, что выражается коэффициентами аппроксимации. При более строгом решении уравнения (1) для случая аппроксимации зависимости $f(u)$ степенным полиномом получим

$$a_2 = \frac{\varepsilon D}{3} \left(\alpha_2 a^2 + \alpha_4 a^4 + \frac{15}{16} \alpha_6 a^6 + \dots \right), \quad (4)$$

$$a_3 = \frac{3 \varepsilon D}{32} \left(\alpha_3 a^3 + \frac{5}{4} \alpha_5 a^5 + \frac{21}{16} \alpha_7 a^7 + \dots \right), \quad (5)$$

$$a_4 = \frac{\varepsilon D}{30} \left(\alpha_4 a^4 + \frac{3}{2} \alpha_6 a^6 + \frac{7}{4} \alpha_8 a^8 + \dots \right), \quad (6)$$

$$a_5 = \frac{5 \varepsilon D}{384} \alpha_5 a^5. \quad (7)$$

Из выражений (4-7) видно, что уровни четных гармоник определяются четными коэффициентами аппроксимации, а нечетных — соответственно нечетными. Амплитуда основного колебания в соответствии с [1, 2] определяется как

$$a = \sqrt{\left[\frac{9\alpha_3^2}{25\alpha_5^2} - \frac{8(\alpha_1 - 1/D)}{5\alpha_5} \right]}. \quad (8)$$

Данная методика оценки уровней гармонических составляющих может быть полезна разработчикам АГ. Но в ряде случаев возникают трудности в точном определении эквивалентных параметров схемы, а любые допущения снижают достоверность результатов расчетов. Этого можно избежать, если использовать расчетно-экспериментальную методику оценки уровней гармоник. Она заключается в экспериментальном определении амплитуды основного колебания, добротности Q и расчете коэффициентов аппроксимации нелинейной характеристики $f(u)$ активного элемента. Тогда из уравнения (8) можно определить значение коэффициента D , учитывающего особенности построения схемы АГ. Далее по выражениям (4 - 7) рассчитываются величины гармонических составляющих.

С использованием данного подхода была проведена оценка уровней гармоник транзисторного АГ сантиметрового диапазона. Расчетные величины α_n и их экспериментальные значения составили соответственно:

- второй — -42 и -52 дБ;
- третьей — -55 и -58 дБ;
- четвертой — -66 и -86 дБ;
- пятой — -70 и -90 дБ.

Анализируя выражения (2 - 7) можно определить пути снижения уровней гармонических составляющих АГ. Одним из них является увеличение добротности Q . Однако этот подход неприемлем в случае, когда необходимо обеспечить заданную полосу контура АГ. Уменьшение α_n путем оптимизации параметров схемы по критерию снижения коэффициента D также не всегда подходит, так как может привести к нарушению условий самовозбуждения генератора, т.е. к срыву колебаний. Большое влияние на величины гармонических составляющих оказывает нелинейность характеристики $f(u)$. Эту особенность следует учитывать при подборе транзистора и выборе режима работы АГ.

Расчеты, проведенные для генератора сантиметрового диапазона, показали, что уровни гармоник имеют максимальные значения в области наибольшей нелинейности характеристики, близкой к напряжению отсечки. Изменением напряжения смещения рабочей точки всего на 0,03 В можно уменьшить их для α_2 , α_3 , α_4 и α_5 , соответственно на 11, 14, 63 и 57 дБ.

При выборе активных элементов и настройке схем АГ по критерию минимизации уровней гармонических составляющих можно пользоваться методикой оценки восприимчивости полупроводниковых приборов к воздействию СВЧ помех. Действие электромагнитной помехи (ЭМП) с частотой f_{II} , превышающей граничную рабочую частоту, на р-п-переход проявляется в увеличении тока перехода на ΔI за счет детектирования огибающей помехи. Результирующий ток при этом можно записать как [3]

$$i = I_0 + \Delta I + 2Ie^{bE_0} \sum_{n=1}^k J_n(bU_{II}) \sin k\omega_{II}t, \quad (9)$$

а увеличение постоянной составляющей тока перехода определяется по выражению

$$\Delta I = Ie^{bE_0} [J_0(bU_{II}) - 1], \quad (10)$$

где I_0 и E_0 - ток и напряжение в рабочей точке до воздействия ЭМП; U_{II} - напряжение помехи.

Таким образом, приращение постоянной составляющей ΔI выходного тока активного элемента при воздействии на него СВЧ помехи будет максимальным в той же точке характеристики, которой соответствуют наибольшие уровни гармонических составляющих АГ. Следовательно, методику оценки восприимчивости транзисторов к воздействию СВЧ помех можно использовать при подборе типа активного элемента АГ или выборе его рабочей точки с целью снижения уровней высших гармоник в спектре выходного сигнала, т.е. выбирать их по наименьшим величинам приращения тока коллектора (стока) при постоянном уровне мощности СВЧ помехи, подаваемой на транзистор.

II. Список литературы

- [1] Боголюбов Н. Н., Митропольский Ю. А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. М.: Наука, 1974. 504 с.
- [2] Титович Н. А. Уменьшение уровней гармонических составляющих транзисторных генераторов// Международный симпозиум по ЭМС: сборник научных докладов. Санкт-Петербург, 1993. Часть 1. -С.171-175.
- [3] Титович Н. А. Анализ влияния радиопомех на характеристики полупроводниковых диодов// 5-й международный симпозиум по ЭМС: сборник научных докладов. Санкт-Петербург, 2003. -С.258-260.

METHODS OF LEVELS DETECTION OF HARMONIC COMPONENTS OF TRANSISTOR OSCILLATORS

Titovich N. A.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

6, P. Brovka Str., Minsk, 220013, Belarus

Ph.: 8-10-375-17 293 88 11, e-mail: tna@dems.by

Abstract — Using a method of slowly varying amplitudes the calculation of levels of harmonic components of SHF micro-waves of the transistor oscillator is carried out. It is shown, that their values are determined not only by elements of the circuit of the generator and amplitude of the basic fluctuation, but also substantially by nonlinearity of the characteristics in the field of a working point. For reduction of levels of harmonic components under adjustment of generators, as a criterion of characteristic nonlinearity estimation, it is offered to use change of size of a constant component of a target current of the transistor in case of influence of SHF signal.