

# РАСЧЕТ УРОВНЕЙ ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ АВТОГЕНЕРАТОРОВ МЕТОДОМ МЕДЛЕННО МЕНЯЮЩИХСЯ АМПЛИТУД

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

г. Минск, Республика Беларусь

Волосач В.С.

Титович Н.А. – к.т.н., доцент

При разработке современных радиоэлектронных средств (РЭС) все более жесткие требования предъявляются к уменьшению уровней их побочных излучений. Для приемо-передающих устройств очень важно нормировать паразитные колебания, возникающие в процессе генерирования и формирования радиосигнала, в частности гармонические составляющие автогенераторов (АГ).

При расчете уровней гармонических составляющих колебательных систем 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]. Колебания в таких системах определяются дифференциальным уравнением вида:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + v^2x = \varepsilon F\left(x, \frac{dx}{dt}\right), \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  – малый положительный параметр;  $F\left(x, \frac{dx}{dt}\right)$  – функция, которая определяется схемой колебательной системы и нелинейностью активного элемента.

При отсутствии возмущения, т.е. при  $\varepsilon = 0$ , колебания будут чисто гармоническими, т.е.  $x = \alpha \cos \psi$ , с постоянной амплитудой  $\alpha$  и равномерно вращающимся фазовым углом:

$$\frac{d\alpha}{dt} = 0, \quad \frac{d\psi}{dt} = v, \quad \psi = vt + \theta.$$

Наличие нелинейного возмущения ( $\varepsilon \neq 0$ ) приводит к появлению в решении уравнения (1) обертонов, обуславливает зависимость мгновенной частоты  $d\psi/dt$  от амплитуды и может вызвать систематическое медленное увеличение или уменьшение амплитуды колебаний в зависимости от притока или поглощения энергии возмущающими силами. Принимая это во внимание, решение уравнения (1) ищется в виде разложения

$$x = \alpha \cos \psi + \varepsilon u_1(\alpha, \psi) + \varepsilon^2 u_2(\alpha, \psi) + \varepsilon^3 u_3(\alpha, \psi) + \dots, \quad (2)$$

в котором  $u_1(\alpha, \psi)$ ,  $u_2(\alpha, \psi)$ , ... являются периодическими функциями угла  $\psi$  с периодом  $2\pi$ , а величины медленно меняющейся амплитуды  $\alpha$  и фазы  $\psi$ , как функция времени, определяются дифференциальными уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\alpha}{dt} &= \varepsilon A_1(\alpha) + \varepsilon^2 A_2(\alpha) + \dots \\ \frac{d\psi}{dt} &= v + \varepsilon B_1(\alpha) + \varepsilon^2 B_2(\alpha) + \dots \end{aligned} \right\}$$

В соответствии с [1] решение уравнения (2) в первом приближении можно представить

$$u = \alpha \cos \psi + \varepsilon u_1(\alpha, \psi), \quad (3)$$

Анализ ряда схем транзисторных АГ ВЧ и СВЧ диапазона показал, что колебания в них можно также описать уравнением с малым положительным параметром в правой части [2]

$$\frac{d^2u}{d\tau^2} + u = \varepsilon \left\{ Gu - [Df'(u) + 1] \frac{du}{d\tau} \right\}, \quad (4)$$

где  $u$  – переменное напряжение между эмиттером и базой;  $\tau = \omega t$ ,  $\omega = 2\pi f$ ;  $f$  – частота колебаний;  $Q$  – добротность контура;  $D = \alpha K L_k / [r C_k (1 + K)]$ ;  $\alpha$  – 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;  $K$  – коэффициент обратной связи АГ;

$G = \delta/d + C_1/[dC_k/(1+K)]$  – для емкостной и  $G = \delta/d + L_k/[dL_1/(1+K)]$  – 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 полевом транзисторе  $G = \delta/d$ ,  $D = -M/(rC_k)$ , где  $M$  – взаимноиндуктивность 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  $f(u) = \sum_{n=0}^k (\alpha_n U_n)$ .

Решение уравнения (4) с использованием методики, описанной в [1], и данных видов аппроксимации позволяет получить выражения для уровней гармонических составляющих, которые в общем виде можно записать как

$$a_n = \frac{\varepsilon D n \alpha^{n-1}}{n^2 - 1}, \quad (5)$$

где  $\alpha$  – амплитуда основного колебания АГ.

Из выражения (5) следует, что уровни гармоник определяются значениями затухания колебательного контура  $d = \varepsilon = 1/Q$ , которое в соответствии с (1, 4) должно быть  $\ll 1$ , параметрами схемы АГ, что выражается коэффициентом  $D$ , амплитудой основного колебания  $\alpha$ , а также в значительной степени зависят от положения рабочей точки, что выражается коэффициентами аппроксимации. При более строгом решении уравнения (4) для случая аппроксимации зависимости  $f(u)$  степенным полиномом получим

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

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

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

$$a_5 = \frac{5\varepsilon D}{384} \alpha_5 a^5. \quad (9)$$

Из выражений (6 – 9) видно, что уровни четных гармоник определяются четными коэффициентами аппроксимации, а нечетных – соответственно нечетными. Амплитуда основного колебания в соответствии с [2] определяется как

$$\sqrt{\frac{9\alpha_3^2}{25\alpha_5^2} - \frac{8(\alpha_1 - 1/D)}{5\alpha_5}}. \quad (10)$$

Данная методика оценки уровней гармонических составляющих может быть полезна разработчикам АГ. Достоверность расчетов во многом зависит от точности определения эквивалентных параметров схемы и аппроксимации характеристики транзистора.

Список использованных источников:

1. Боголюбов Н.Н., Митропольский Ю.А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. М.: Наука, 1974. Часть 1, 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.