

АНАЛИЗ ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ТРАНЗИСТОРНЫХ АВТОГЕНЕРАТОРОВ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Яковчук А.С.

Титович Н.А. – к.т.н., доцент

В работе рассматривается метод расчета уровней гармонических составляющих транзисторных автогенераторов (АГ), колебания в которых описываются дифференциальным уравнением с малым положительным параметром в правой части. Приведены уравнения для определения уровней гармоник при аппроксимации характеристики транзистора степенным полиномом. Предложено использовать более точную расчетно-экспериментальную методику для оценки уровней гармонических составляющих.

Неотъемлемой частью возбудителей передатчиков, гетеродинов приемников, измерительной аппаратуры, являются генераторы колебаний. При проектировании схем генераторов требуется принимать меры по подавлению гармонических составляющих. Для более успешного решения этой задачи необходимо проводить оценку уровней гармоник, выявлять их зависимость от параметров схемы и активного элемента. Это позволит в значительной мере упростить решение вопроса по их снижению. 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. Анализ ряда схем транзисторных АГ ВЧ и СВЧ диапазона показал, что колебания в них можно описать уравнением с малым положительным параметром в правой части [1]. С учетом того, что любую из этих схем можно представить эквивалентной трехточечной схемой, это уравнение имеет вид

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

где u - переменное напряжение между эмиттером и базой; $\tau = \omega_0^{-1} \omega^{-2} f$ - частота колебаний; Q - добротность контура; $D = \frac{D_{\text{кк}}}{L_{\text{кк}}(1+K)}$; α - коэффициент передачи транзистора по току в схеме с общей базой; $r = L_{\text{кк}} / (C_{\text{кк}} R_{\text{кк}})$; $C_{\text{к}}$, $R_{\text{к}}$ и $L_{\text{к}}$ - включенные параллельно эквивалентные емкость, сопротивление и индуктивность колебательного контура между коллектором и базой [1]; K - коэффициент обратной связи АГ; $G = \delta/d + C_1 / [dC_{\text{к}} / (1+K)]$ - для емкостной и $G = \delta/d + L_{\text{к}} / [dL_1 / (1+K)]$ - для индуктивной трехточечной схемы; $\delta = 1 - \omega^2 / \omega_0^2$ - относительная расстройка контура АГ; $\omega_0 = 1 / \sqrt{L_{\text{к}} C_{\text{к}}}$ - 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 $G = \delta/d$, $D = -M / (rC_{\text{к}})$, где M - значение взаимоиנדуктивности цепи обратной связи [1].

Анализ уравнений, полученных для различных схем автогенераторов показывает, что все они имеют подобный вид и отличаются только коэффициентом, в правой части который зависит от параметров схемы и характеристик активного элемента.

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 $f(u) = \sum_{n=0}^k (\alpha_n U^n)$, где α_n - коэффициенты аппроксимации.

Решение уравнения (1) с использованием методики, описанной в [2], и данных видов аппроксимации позволяет получить выражения для уровней гармонических составляющих, которые в общем виде можно записать как

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

где a - амплитуда основного колебания АГ определяется как

$$a = \left(\frac{-3\alpha}{5\alpha} - \sqrt{\frac{9\alpha_3^2}{25\alpha_5^2} - \frac{8\left(\alpha - \frac{1}{D}\right)}{5\alpha_5}} \right)^{1/2} \quad (3)$$

Точную аппроксимацию нелинейной характеристики транзистора дает также экспоненциальный полином, когда ток активного элемента представляется суммой экспонент.

С целью проверки предлагаемой методики проведен анализ схемы СВЧ автогенератора с общей базой, с частотой 5,815 ГГц, уровни гармонических составляющих которого были ранее измерены. Результаты расчетов достаточно хорошо коррелируются с данными экспериментов.

Определения гармоник автогенераторов с использованием метода медленно меняющихся амплитуд требует достаточно полной информации о параметрах схемы генератора, его активного элемента. Кроме того, значения многих параметров изменяются при настройке схемы. Из-за недостатка исходных данных приходится делать ряд допущений, что непременно снижает точность расчетов.

Более простым и точным представляется расчетно-экспериментальная методика оценки уровней гармонических составляющих, основанная на использовании аналитических выражений метода медленно меняющихся амплитуд и несложных экспериментальных исследованиях. Из уравнения (3) несложно определить коэффициент D

$$D = \frac{1}{\alpha_1 + \frac{3}{4}\alpha_3\alpha^2 + \frac{5}{8}\alpha_5\alpha^4} \quad (4)$$

который зависит от параметров схемы АГ и его активного элемента и для каждой схемы имеет свое конкретное значение. Значение малого положительного параметра для всех схем равно или близко к значению затухания

генератора d . Известно, что значение затухания $d = \frac{1}{Q}$, где Q , - добротность колебательной системы, которую

можно легко определить экспериментально как $Q = \frac{f}{2\Delta f}$, где f - частота основного колебания, а $2\Delta f$ - полоса

пропускания контура. Суть методики заключается в определении значений добротности Q и амплитуды основного колебания a , а также точной аппроксимации нелинейной характеристики транзистора. Достоинство его в том, что для расчета уровней гармоник не требуется большого числа исходных данных. Очевидно, что определение значений Q и a является простой задачей. Точность расчетов определяется качеством аппроксимации нелинейной характеристики. Очевидно, что она выше, чем в аналитическом методе, так как расчетно-экспериментальный метод исключает принятие ряда допущений.

Из вышеизложенного можно предположить, что полученные выражения и предложенные методики оценки уровней гармонических составляющих могут быть использованы не только для транзисторных АГ, но и для генераторов на других активных элементах, так как любой из них может быть представлен эквивалентной трехточечной схемой, а колебательный процесс в нем описан уравнением вида (1).

Список использованных источников:

1. Титович Н.А. Расчет уровней гармонических составляющих транзисторных автогенераторов широкого частотного диапазона// Радиотехника и электроника. -Мн.: Выш.шк., 1989. -Вып.19. -С.123-127.
2. Боголюбов Н.Н., Митропольский Ю.А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. -М.: Наука, 1974. 504 с.