

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники

УДК _____

Волосач Виктория Сергеевна

Гармонические составляющие транзисторных автогенераторов

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра технических наук
по специальности 1-39 80 02 Радиотехника, в том числе системы и
устройства радионавигации, радиолокации и телевидения

Научный руководитель

Титович Николай Алексеевич
кандидат технических
наук, доцент

Минск 2018

ВВЕДЕНИЕ

Неотъемлемой частью возбудителей передатчиков, гетеродинов приемников, измерительной аппаратуры являются генераторы колебаний. В современных условиях в связи с повышенными требованиями к габаритам и весу аппаратуры, ее надежности наибольшее распространение получили твердотельные генераторы, выполненные на полупроводниковых элементах. С появлением большого многообразия полупроводниковых диодов, транзисторов стало возможным разрабатывать схемы и конструкции генераторов, удовлетворяющие самым разнообразным требованиям: мощные, высокостабильные, работающие в широком диапазоне частот. В современных многокаскадных передатчиках выходная мощность задающих генераторов не играет существенной роли. Наряду с этим следует отметить все более жесткие ограничения на уровни побочных излучений генераторов. Именно поэтому при проектировании схем генераторов требуется принимать необходимые меры по их подавлению. Для более успешного решения этой задачи важно при проектировании генератора проводить оценку уровней гармонических составляющих. Это позволит в значительной мере упростить решение вопроса подавления этих колебаний в последующих каскадах.

Как известно, измерение уровней гармонических составляющих является довольно сложной задачей, особенно для генераторов, работающих в диапазоне СВЧ. В связи с этим актуальным становится вопрос разработки методик оценки этих колебаний другими, более простыми методами, связанными с измерениями на частотах близких к основной. Целью данной работы является разработка методики оценки уровней составляющих транзисторных автогенераторов с помощью аналитических соотношений сравнение рассчитанных значений с результатами экспериментальных исследований.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

При разработке радиоэлектронной аппаратуры очень важно нормировать паразитные колебания, возникающие в процессе генерирования и формирования радиосигнала. Наибольшие уровни имеют помехи с частотой, кратной частоте основного несущего колебания, именуемые в литературе как гармонические составляющие. При проектировании автогенераторов необходимо принимать меры по снижению уровней гармонических составляющих, кратных основной частоте, так как подавление их в последующих каскадах требует применения специальных фильтров, а соответственно и увеличения затрат. Расчет уровней гармонических составляющих удобно проводить методом медленно меняющихся амплитуд, который имеет достаточно высокую точность и позволяет понизить порядок нелинейного дифференциального уравнения, описывающего колебательный процесс в автогенераторе, до второго.

Результаты работы позволят разработать достаточно точную и в то же время простую методику расчета уровней гармонических составляющих автогенераторов.

Цель работы: Разработка методики расчета уровней гармонических составляющих транзисторных генераторов.

Задачи исследования: 1. Анализ методов расчета уровней гармонических составляющих. Оценка достоинств и недостатков известных методов. 2. Описание и обоснованием выбора метода медленно меняющихся амплитуд. 3. Составление нелинейного дифференциального уравнения транзисторного автогенератора. 4. Аппроксимация характеристик транзисторов с целью определения параметров нелинейного дифференциального уравнения. 5. Расчет уровней гармонических составляющих методом медленно меняющихся амплитуд. 6. Сравнение полученных результатов с результатами эксперимента.

Объект исследования: Транзисторные автогенераторы.

Предмет исследования: Уровни гармонических составляющих

транзисторных автогенераторов, возникающие при формировании ВЧ и СВЧ колебаний основной частоты.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Актуальность темы расчета уровней гармонических составляющих транзисторных генераторов. Постановка задачи.

1. Анализ методов расчета уровней гармонических составляющих. Оценка достоинств и недостатков методов: линеаризации, квазилинейного, малого параметра, фазовой плоскости, медленно меняющихся амплитуд, моделирования. Обоснование выбора метода расчета уровней гармонических составляющих транзисторных автогенераторов.

2. Описание метода медленно меняющихся амплитуд. Особенности методики проведения расчетов применительно к радиотехнике. Исходные данные для расчета.

3. Составление нелинейного дифференциального уравнения транзисторного автогенератора. Анализ различных схем автогенераторов и определение параметров уравнения для каждой из них.

4. Аппроксимация характеристик транзисторов с целью определения параметров нелинейного дифференциального уравнения. Анализ методов аппроксимации. Выбор метода аппроксимации.

5. Расчет уровней гармонических составляющих методом медленно меняющихся амплитуд. Определение эквивалентных параметров транзистора и реальной схемы транзисторного автогенератора. Анализ полученных результатов.

6. Экспериментальные методики измерения уровней гармонических составляющих транзисторных автогенераторов. Сравнение полученных результатов с результатами расчетной оценки.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

1. Волосач В.С. Расчет уровней гармонических составляющих автогенераторов методом медленно меняющихся амплитуд / Материалы 53-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР. 2017г. Доклады секции «Информационные радиотехнологии». Мн.: БГУИР, с. 15-16.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При разработке методики уровней гармонических составляющих транзисторных автогенераторов для анализа использован метод медленно меняющихся амплитуд. Он является более точным по сравнению с широко применяющимся квазилинейным методом, так как не использует линеаризации нелинейных характеристик, и более простым по сравнению с методом математического моделирования, так как за счет понижения порядка нелинейного дифференциального уравнения не требует больших вычислительных затрат. Анализ различных схем автогенераторов показал, что любую из них можно описать нелинейным дифференциальным уравнением с малым положительным параметром. На основании решения данного уравнения получены аналитические выражения для расчета уровней второй–пятой гармоник.

При оценке уровней гармонических составляющих схемы автогенератора с фиксированной частотой настройки 5,815 ГГц установлено, что величины гармоник в меньшей степени зависят от изменения параметров колебательной системы и схемы. При возрастании эквивалентной емкости контура с 0,28 до 0,8 пФ их уровни снижаются на 6-8 дБ. Наибольшее влияние на величину гармонических составляющих оказывает нелинейность вольтамперной характеристики транзистора, что в первую очередь определяется напряжением смещения рабочей точки. Измерения смещения с 0,7 до 0,73 В приводит к уменьшению уровня второй гармоники на 11 дБ, третьей – на 14 дБ, четвертой – на 63 дБ, пятой – на 57 дБ. При анализе наихудшего случая расчетные уровни гармонических составляющих составили соответственно -40, -43, -61, и -72 дБ.

В связи с тем, что результаты расчетов главным образом определяются нелинейностью характеристики прибора, важное значение имеет вопрос ее точной аппроксимации. С этой целью проведен анализ методов

аппроксимации вольтамперных характеристик, для решения задачи выбраны наиболее точная и удобная из них: аппроксимация полиномом пятой степени с определением коэффициентов по способу наименьших квадратов.

Описана методика оценки уровней гармоник генератора косвенным методом. Показано, что значения нечетных гармонических составляющих можно определить измерив в полосе пропускания контура комбинационные составляющие основного и помехового сигналов, незначительно отличающихся по частоте. Значения четных гармоник можно определить, проведя точные измерения приращения тока постоянной составляющей при воздействии двух сигналов.

На основании проведенных исследований разработана расчетно – экспериментальная методика оценки уровней гармонических составляющих, которая на основе знания добротности, коэффициентов аппроксимации нелинейной характеристики активного элемента и уровня амплитуды основного колебания генератора позволяет просто и достаточно точно определить уровни гармоник.

Проведено сравнение результатов расчета с данными экспериментальной оценки уровней гармонических составляющих СВЧ-генератора с частотой 5,815 ГГц. Анализ показал, что расчетные и экспериментальные значения качественно совпадают и с учетом погрешности измерений имеют одинаковые порядки. Результаты работы доложены на 53-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР и опубликованы в сборнике [18].

Разработанные методики оценки уровней гармоник могут быть использованы при анализе различных схем транзисторных автогенераторов.

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 ε – 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. $x = a \cos \psi$, с постоянной амплитудой a и равномерно вращающимся фазовым углом:

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

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

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

в котором $u_1(\alpha, \psi)$, $u_2(\alpha, \psi)$, ... являются периодическими функциями угла ψ с периодом 2π , а величины медленно меняющейся амплитуды α и фазы ψ , 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

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

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]

$$\frac{d^2x}{dt^2} + v^2x = \varepsilon F\left(x, \frac{dx}{dt}\right), \quad (4)$$

где u – переменное напряжение между эмиттером и базой; $\tau = \omega t, \omega = 2\pi f$; f – частота колебаний; Q – добротность контура; $D = \alpha K L_k / [r C_k (1 + K)]$; 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; 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 полевом транзисторе $G = \delta/d, D = -M/(r C_k)$, где M – взаимоиנדуктивность 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

$$a_n = \frac{\varepsilon D n \alpha^{n_2^{1-n}}}{n^2 - 1}, \quad (5)$$

где α – 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 α , 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

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

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

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

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

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.