УДК 621.391

АНАЛИЗ КВАРЦЕВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ С УЧЕТОМ ИХ НЕЛИНЕЙНЫХ СВОЙСТВ

Косулина Н. Г.[1], Черенков А. Д.[1], Янукович Г. И.[2]

[1] *Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко,*
[2] *Белорусский государственный аграрный технический университет (г. Минск)*

Предложен анализ параметров кварцевого автогенератора на основе функционального метода с учетом нелинейных и динамических свойств генератора.

Постановка проблемы. Кварцевые генераторы находят применение в системах автоматики, телемеханики, вычислительной техники, информационных технологиях связанных с воздействием электромагнитного поля на биологические объекты растениеводства и животноводства.

Вопросам исследования кварцевых автогенераторов уделено большое внимание в целом ряде работ [1, 2, 3]. Однако нелинейные и динамические свойства автогенераторов описываются нелинейными дифференциальными уравнениями высокого порядка, исследование которых является чрезвычайно сложной задачей. В связи с чем, на наш взгляд, наиболее эффективным методом анализа параметров кварцевых автогенераторов является функциональный метод, который в настоящее время представляет собой одно из самых перспективных направлений в теории нелинейных систем [3, 4].

В настоящее время существует большое количество различных схем кварцевых генераторов, использующих гармоники резонаторов до частот 1 ГГц. При выборе схем и расчетах кварцевого генератора необходимо учитывать, что генерируемая частота является нелинейной функцией режима работы генератора (напряжения питания, величины нагрузки, коэффициента обратной связи) и величины реактивностей, входящих в схему.

Анализ последних исследований и публикаций. Возможности применения функционального метода для исследования автогенераторов обсуждались в работе [3]. Однако методика, разработанная в данной работе, основана на предположении о сепарабельности ядер Вольтерра автогенератора (сепарабельность ядра Вольтера n-го порядка означает, что оно равно n-й степени ядра Вольтерра первого порядка), что почти не выполняется для реальных нелинейных систем [4, 5, 6].

Цель статьи. Целью настоящей статьи является разработка нового подхода к исследованию кварцевых генераторов, основанного на применении функционального метода без введения каких-либо априорных ограничений на вид ядер Вольтерра.

Основной материал исследований. 1. Обоснование обобщенной нелинейности модели кварцевого генератора.

В общем случае кварцевый генератор представляет собой систему, состоящую из нелинейного активного элемента (транзистор), охваченного положительной обратной связью (рис. 1).

В момент запуска в колебательной системе кварцевого автогенератора возникают свободные колебания, обусловленные флуктуационными шумами элементов схемы. Благодаря наличию положительной обратной связи эти колебания усиливаются, что и приводит к возникновению автоколебаний. Наличие нелинейности характеристик активного элемента приводит к уменьшению усиления до такого уровня, при котором только компенсируется затухание колебаний в нагрузке.

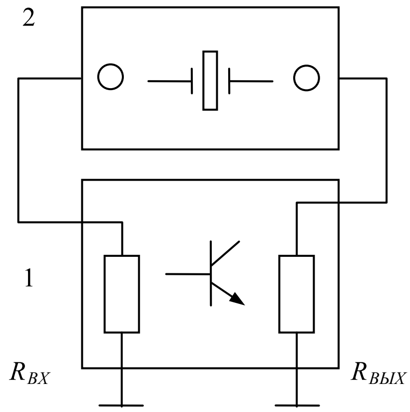

Рисунок 1 – Обобщенная структурная схема кварцевого генератора

Пользуясь методами теории шумящих электрических цепей [7, 8], можно рассчитать флуктуации для любой конкретной системы автогенератора и пересчитать их к входу активного элемента. Следовательно, источник флуктуаций, приводящий к возникновению свободных колебаний, можно условно изобразить вне схемы автогенератора – на входе активного элемента.

Изобразив выход автогенератора на внешнюю нагрузку, получим обобщенную нелинейную модель автогенератора, где $x(t)$ – флуктуации схемы автогенератора, пересчитанные на вход активного элемента; $y(t)$ – выходной сигнал автогенератора.

Легко видеть, что обобщенная нелинейная модель автогенератора представляет собой типичную нелинейную систему с обратной связью, для исследования которой наиболее удобным является функциональный метод [4, 5, 6].

Согласно данному методу выходной сигнал автогенератора $y(t)$ может быть записан в виде ряда Вольтерра от флуктуаций схемы, пересчитанных на вход активного элемента $x(t)$, т.е.:

$$y(t)=\sum_{n=1}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\dots\int R_n(\tau_1,\dots\tau_n)\prod_{i=1}^{n}x(t-\tau_i)\partial\tau_i\,, \quad (1)$$

где $R_n(\cdot)$ – ядро Вольтерра n-го порядка ($n = 1, 2\dots$).

Совокупность независимых от вида входного сигнала ядер Вольтерра однозначно и полностью описывает свойства исследуемой системы. Необходимо отметить, что определение ядер Вольтерра однозначно и полностью описывает свойства исследуемой системы. Необходимо отметить, что определение ядер Вольтерра является основной задачей, возникающей при исследовании нелинейных систем с помощью функционального метода [4, 5, 6]. Количество членов ряда (1) определяется требуемой для данной задачи точностью вычислений. Для режима мягкого самовозбуждения автогенератора достаточно учесть первые три члена из разложения характеристик нелинейного элемента в ряд Тейлора [1]. Следовательно, учет первых трех членов ряда Вольтерра гарантирует достаточно высокую точность анализа.

2. Определение ядер Вольтера для основных разновидностей обобщенной нелинейной модели автогенератора. Если активный элемент, стоящий в цепи прямой связи, принципиально должен быть нелинейный [1], то цепь обратной связи может быть линейной или нелинейной. Для этих двух основных разновидностей обобщенной модели автогенератора определим ряд Вольтерра.

Случай нелинейной обратной связи является наиболее сложным в теоретическом отношении. Запишем исходное уравнение автогенератора:

$$y(t)=A\{x(t)+B[y(t)]\}, \quad (2)$$

где $A\{\cdot\}$ – нелинейный оператор, описывающий активный нелинейный элемент;

$B\{\cdot\}$ – нелинейный оператор, описывающий цепь обратной связи.

Для определения ядер Вольтерра необходимо разложить $y(t)$ в ряд Вольтерра $y(t)=\sum_{n=1}^{\infty}y_n(t)$ и подставить в выражение (2), предварительно разложив характеристики всех нелинейных элементов в ряды Вольтерра (Тейлора) [4]. Получим:

$$\sum_{n=1}^{\infty}y_n(t)=\sum_{i=1}^{\infty}A_i\left\{x(t)+\sum_{j=1}^{\infty}B_j\left[\sum_{n=1}^{\infty}y_n(t)\right]^j\right\}^i. \quad (3)$$

Приравнивая члены, содержащие $x(t)$ в одинаковой степени, можно получить уравнение, Ограничиваясь ядрами Вольтерра первых трех порядков и применяя теорию многомерных преобразований Лапласа [4…6], находим:

$$H_1(p_1)=\frac{A_1(p_1)}{1-A_1(p_1)B_1(p_1)}\,; \quad (4)$$

$$H_2(p_1,p_2)=\frac{A_2(p_1,p_2)\prod_{i=1}^{2}[1+B_1(p_i)H_1(p_i)]+}{1-A_1(p_1+p_2)B_1(p_1+p_2)}\frac{+A_1(p_1+p_2)B_2(p_1,p_2)\prod_{i=1}^{2}H_1(p_i)}{1}; \quad (5)$$

$$H_3(p_1,p_2,p_3)=\frac{A_3(p_1,p_2,p_3)\prod_{i=1}^{3}[1+B_1(p_i)H_1(p_i)]+}{1-A_1(p_1+p_2+p_3)B_1(p_1+p_2+p_3)}$$

$$\frac{+A_1(p_1+p_2+p_3)B_3(p_1,p_2,p_3)}{1}\times$$

$$\times\frac{\prod_{i=1}^{3}H_1(p_i)2A_2(p_1,p_2+p_3)[1+B_1(p_1)]}{1-A_1(p_1+p_2+p_3)B_1(p_1+p_2+p_3)}$$

$$\frac{[B_1(p_2+p_3)H_2(p_2,p_3)+B_2(p_2,p_3)}{1}\times$$

$$\times\frac{\left.\prod_{i=2}^{3}H_1(p_i)\right]+A_1(p_1+p_2+p_3)2B_2(p_1,p_2)\times}{1-A_1(p_1+p_2+p_3)B_1(p_1+p_2+p_3)} \quad (6)$$

$$\frac{\times H_1(p_1)H_2(p_2,p_3)}{1},$$

где $H_1(p_1)$; $H_2(p_1,p_2)$; $H_3(p_1,p_2,p_3)$ – ядра Вольтерра трех порядков в многомерной комплексной области; p_1,p_2,p_3 – комплексные переменные;

$A_1(p_1)$; $A_2(p_1,p_2)$; $A_3(p_1,p_2,p_3)$; $B_1(p_1)$; $B_2(p_1,p_2)$; $B_3(p_1,p_2,p_3)$ – ядра Вольтерра первых трех порядков из разложения нелинейных операторов $A\{\cdot\}$ и $B[\cdot]$ соответственно в ряд Вольтерра [9].

В случае линейной обратной связи ядра Вольтерра можно получить аналогичным разложением уравнения (3), считая в нем $B[\cdot]$ линейным оператором. Возможен и более простой путь – приравнять к нулю в полученных выше выражениях (4), (5), (6) все члены разложения оператора $B[\cdot]$ цепи обратной связи в ряд Вольтерра, порядок которых выше единицы, т.е. $B_2(\cdot)\doteq B_3(\cdot)\doteq 0$. При этом получим:

$$H_1(p_1)=\frac{A_1(p_1)}{1-A_1(p_1)B_1(p_1)}\,; \quad (7)$$

$$H_2(p_1,p_2)=\frac{A_2(p_1,p_2)[1+B_1(p_1)][1+B_1(p_2)H_1(p_2)]}{1-A_1(p_1+p_2)B_1(p_1+p_2)}\,;(8)$$

$$H_3(p_1,p_2,p_3)=\frac{A_3(p_1,p_2,p_3)\prod_{i=1}^{3}\left[1+B_1(p_i)H_1(p_i)\right]+}{1-A_1(p_1+p_2+p_3)}$$

$$\frac{+2A_2(p_1,p_2+p_3)}{1}\times$$

$$\times\frac{\left[1+B_1(p_1)H_1(p_1)\right]B_1(p_1+p_2)H_2(p_1,p_2)}{B_1(p_1+p_2+p_3)}. \quad (9)$$

Выражения (4) – (6) и (7) – (9) не являются сепарабельными.

3. Возможные применения полученных результатов. Прежде всего рассмотрим физический смысл определенных выше ядер Вольтерра автогенератора.

Ядро Вольтерра первого порядка описывает полезную составляющую выходного сигнала автогенератора на частоте f [4…6]. Ядро Вольтерра второго порядка описывает сигнал на второй гармонике частоты полезного сигнала, т.е. на частоте $2f$, а также смещение рабочей точки вследствие нелинейных искажений. Ядро Вольтерра третьего порядка $H_3(p_1,p_2,p_3)$ описывает сигнал на частоте $3f$, а также нелинейные искажения полезного сигнала на частоте f. Отношение ядра Вольтерра n-го порядка к ядру Вольтерра первого порядка позволяет определить коэффициент нелинейных искажений n-го порядка и рассчитать его зависимость от частоты [5]:

$$K_n=20\lg\frac{1}{2^{n-1}}\cdot\frac{H_n(p_1,\ldots,p_n)}{\prod_{i=1}^{n}H_1(p_i)}. \quad (10)$$

Вычислив флуктуации автогенераторов, пересчитанные ко входу активного элемента, можно определить спектр выходного сигнала автогенератора [4] либо (применив обратное преобразование Лапласса) временные характеристики выходного сигнала [5, 6]. Данные результаты могут быть использованы при расчете других качественных показателей автогенератора, например, характеристик нестабильности частоты [4]. Логическим продолжением задач является параметрическая оптимизация исследуемого автогенератора, связанные с вариацией параметров схемы в целях подбора оптимального в некотором смысле набора параметров [4]. Используя понятие мажоранты ряда Вольтерра [6], можно провести исследование устойчивости работы автогенератора. При этом ряд Вольтерра (1) заменяется алгебраическим мажорирующим рядом, что существенно упрощает исследование:

$$\|Y\|=\sum_{n=1}^{\infty}\|Y_n\|, \quad (11)$$

где:

$$\|Y_n\|=\max_{-\infty<t<\infty}|y_n(t)|=\max_{-\infty<t<\infty}\left|\int_{-\infty}^{\infty}\ldots\int n_n(\tau_1,\ldots,\tau_n)\prod_{i=1}^{n}x(t-\tau_i)\partial\tau_i\right|.$$

Выводы. В целом результаты данной статьи могут быть использованы при исследовании нелинейных и динамических свойств различных видов автогенераторов до частот 1…2 ГГц.

Список использованных источников

1. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы / Гоноровский И. С. – М.: Сов. радио, 1977. – 608 с.
2. Малахов А. Н. Флуктуации в автоколебательных системах / Малахов А. Н. – М.: Наука, 1967. – 660 с.
3. Кабанов Д. А. Обобщенный подход к исследованию автогенераторов / Кабанов Д. А. // Радиотехника и электроника. – 1974, № 8. – С. 1690–1697.
4. Макаренко Б. И. К вопросу о выборе оптимальных значений параметров фазовой автоподстройки частоты в мерах частоты с квантовым генератором / Макаренко Б. И., Султанов А. С., Иванов М. А. // Радиотехника. – Харьков, Вища школа. – 1978, Вып. 45. – С. 57–62.
5. Narajanan S. Application of Volterra series to intermodulation distortion analysis of transistor feedback amplifies / Narajanan S. // IEEE. Trans. Circuit Theory. – 1970. – P. 518–528.
6. Landau M. Application of the Volterra series to the analysis and design of angle track loop / Landau M., Leondes C. // IEEE. Trans. Aerospace and Electron Systems. – 1972, №3. – P. 306–322.
7. Сухоедов И. В. Шумы электрических цепей (Теория) / Сухоедов И. В. – М.: Связь, 1975. – 352 с.
8. Сухоедов И. В. Шумы электрических цепей (Расчет) / Сухоедов И. В. – М.: Связь, 1976. – 120 с.
9. Бустанг. Анализ нелинейных систем при воздействии нескольких входных сигналов / Бустанг, Эрман, Грейам. – ТИИЭР, 1974, Т. 62, № 8. – С. 56–92.

Аннотація

АНАЛІЗ КВАРЦЕВИХ ГЕНЕРАТОРІВ З УРАХУВАННЯМ НЕЛІНІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ

Косуліна Н. Г., Черенков О. Д., Януковіч Г. І.

Запропоновано аналіз параметрів кварцового автогенератора на основі функціонального методу з урахуванням нелінійних та динамічних властивостей генератора.

Abstract

ANALYSIS OF CCOS TAKING INTO ACCOUNT THEIR NONLINEAR PROPERTIES

N. Kosulina, A. Cherenkov, G. Janukovich

Approach of analysis of parameters of quartz ascillator is founded on the basis of functional method taking into account nonlinear and dynamic properties of generator.