УДК 519.615

И. Е. ДОБРИНА

ОРБИТАЛЬНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ КОЛЕБАНИЙ В АВТОНОМНОМ АВТОГЕНЕРАТОРЕ С КВАДРАТИЧНЫМ БЕЗЫНЕРЦИОННЫМ СМЕЩЕНИЕМ

Введение. Широкое использование автогенераторов в различных областях науки и техники не только в качестве источников колебаний, а главным образом как функциональных преобразователей, обусловлено их большими потенциальными возможностями. Измерительные схемы с автогенераторами часто являются наиболее эффективными, а иногда и единственными, позволяющими обеспечить требуемые характеристики отдельных устройств и систем в целом [1, 2].

Одним из факторов, сдерживающим дальнейшее совершенствование характеристик измерительных автогенераторов, является нестабильность их параметров, обусловленная разбросом параметров элементов и их нестабильностью. Особенно это относится к усилительному элементу. Существующие в настоящее время меры по стабилизации параметров или слишком сложны и громоздки, или не всегда позволяют удовлетворить предъявляемым требованиям.

Цель статьи. Для улучшения стабильности работы автогенератора предлагается безынерционное квадратичное автосмещение. Одним из основных требований к автогенераторам является устойчивость стационарных колебаний. Таким образом, целью статьи является исследование орбитальной устойчивости колебаний автогенератора с безынерционным квадратичным автосмещением.

Математическая модель автогенератора с безынерционным квадратичным автосмещением. Рассмотрим одноконтурный LC – автогенератор с безынерционным квадратичным автосмещением, функциональная схема которого представлена на рис. 1, где 1 – автогенератор, 2 – устройство возведения в квадрат, 3 – узкополосный фильтр, 4 – сумматор, 5 – источник фиксированного смещения, 6 – согласующий каскад

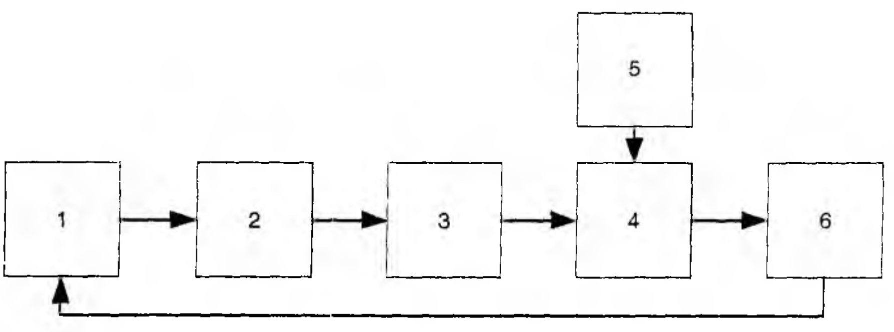

Рис. 1

Устройство работает следующим образом. Сигнал автогенератора 1 с выхода четырехполюсника положительной обратной связи $u = A_{(t)} \cos(\omega_0 t)$ подается на вход устройства возведения в квадрат 2, на выходе которого имеем $u_1 = A_{(t)}^2/2\cos(2\omega_0 t) + A_{(t)}^2/2$. Далее он поступает на вход узкополосного фильтра 3, где устраняется переменная составляющая. Эта составляющая имеет частоту, в два раза большую частоты колебаний, что на несколько порядков превышает частоту высшей гармонической составляющей спектра низкочастотной компоненты $A_{(t)}^2$. В связи с этим параметры элементов узкополосного фильтра не влияют на спектр выходного низкочастотного сигнала $A_{(t)}^2$. Далее сигнал совместно с выходным сигналом U_0 источника фиксированного смещения 5 обрабатывается сумматором 4, на выходе которого получаем $nA^2 + U_0$. Это смещение посредством согласующего каскада 6 попадает на усилительный элемент автогенератора.

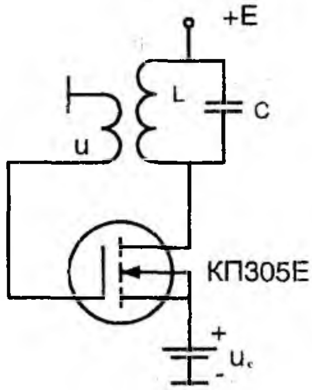

Рис. 2

Допустим, что в качестве собственно автогенератора используется одноконтурный LC – автогенератор с трансформаторной обратной связью, изображенный на рис. 2. Здесь напряжение автосмещения $u = nA^2 + U_0$ пропорционально квадрату амплитуды колебаний и является безынерционным (постоянная составляющая U_0 в принципе может и отсутствовать). Считаем, что усилительный элемент автогенератора является безынерционным, и аппроксимируем его полиномом четвертой степени:

$$i = a_0 + a_1 u_y + a_2 u_y^2 + a_3 u_y^3 + a_4 u_y^4, \qquad (1)$$

где $u_y = u + nA^2 + U_0$; u, как указывалось ранее, описывается выражением $u = A_{(t)} \cos(\omega_0 t)$. Так как данный автогенератор работает в режиме колебаний второго рода, то коэффициенты аппроксимирующего полинома находим с помощью метода, изложенного в [3]. Тогда нелинейное дифференциальное уравнение после пренебрежения малыми членами, описывающее процессы в автогенераторе, имеет вид

$$\frac{du^2}{d\tau^2} - \varepsilon\left(1 - 2\beta\left(nA^2\right) - 3\gamma u^2\right)\frac{du}{d\tau} + u = 0, \qquad (2)$$

где $\tau = \omega_0 t$ – безразмерное время; $\varepsilon = \delta_1 \alpha$ – малый параметр; $\delta_1 = 1/\vartheta$; ϑ – добротность контура автогенератора; $\alpha = kR\alpha_{01} - 1$; $\beta = \beta_{01}/\alpha'_{01}$; $\gamma = \gamma_{01}/\alpha'_{01}$; $\alpha'_{01} = 1/kR - \alpha_{01}$; $\alpha_{01} = a_1 + 2a_2 U_0 + 3a_3 U_0^2 + 4a_4 U_0^3$; $\beta_{01} = a_2 + 3a_3 U_0 + 6a_4 U_0^2$; $\gamma_{01} = a_3 + 4a_4 U_0^3$; $\delta_{01} = a_4$; R – сопротивление контура в резонансе; $k = M/L$ – коэффициент положительной обратной связи; M – взаимная индуктивность; L – индуктивность контура автогенератора; ω_0 – резонансная частота контура.

При выводе вышеуказанного уравнения предполагалось, что

$$\left|3\gamma_{01}\left(nA^2\right)^2\right| \le \left|\alpha_{01} + 2\beta_{01}\left(nA^2\right)\right|,$$

$$\left|4\delta_{01}\left(nA^2\right)^3\right| \le \left|\alpha_{01} + 2\beta_{01}\left(nA^2\right)\right|,$$

$$\left|6\delta_{01}\left(nA^2\right)^2\right| \le \left|\beta_{01} + 2\gamma_{01}\left(nA^2\right)\right|,$$

$$\left|4\delta_{01}\left(nA^2\right)\right| \le \left|\gamma_{01}\right|.$$

Эти условия обычно выполняются, так как параметр $n \ll 1$. Диапазон изменения этого параметра невелик: $0 < n < 0{,}1$. Перейти к исследованию устойчивости колебаний непосредственно из полученного уравнения не предоставляется возможным ввиду его сложности. Для этого надо предварительно разделить быстрые и медленные движения.

Считаем, что добротность контура автогенератора велика, амплитуда и фаза колебаний являются медленно меняющимися функциями времени. Решение уравнения будем искать в виде $u = A_\tau \cos(\tau)$. Используя метод усреднения, переходим к укороченным уравнениям:

$$\frac{dA}{d\tau} - \frac{\varepsilon}{2}\left[A - \left(\frac{3}{4}\gamma + 2\beta n\right) \cdot A^3\right] = 0. \tag{3}$$

Рассмотрим стационарный режим. Тогда уравнение для определения амплитуды колебаний приобретает вид:

$$A_0\left[1 - \left(\frac{3}{4}\gamma + 2\beta n\right) \cdot A^2\right] = 0. \tag{4}$$

Из него следует, что в вышеуказанном режиме амплитуда колебаний A_0 может быть равна нулю или же может быть найдена из выражения $A_0 = 1\Big/\sqrt{\frac{3}{4}\gamma + 2\beta n}$. Изменением параметра n осуществляется регулировка величины амплитуды колебаний в широких пределах, что позволяет избежать перенапряженного режима и тем самым увеличить стабильность частоты сигнала автогенератора. Для исследования орбитальной устойчивости необходимо найти зависимость между скоростью изменения амплитуды колебаний $dA/d\tau$ и самой амплитудой:

$$\frac{d\dot{A}}{dA} = \frac{\varepsilon}{2}\left[1 - 3\left(\frac{3}{4}\gamma + 2\beta n\right)A^2\right] = \frac{\varepsilon}{2}\left[1 - 3\left(\frac{A}{A_{02}}\right)^2\right]. \tag{5}$$

Если $A = A_{02}$, то, как нетрудно заметить, $d\dot{A}/dA =< 0$, т.е. производная отрицательна. Это является признаком орбитальной устойчивости в непосредственной близости от равновесного значения амплитуды колебаний A_{02}.

Выводы. Механизм влияния квадратичного автосмещения традиционен: увеличение амплитуды колебаний по каким-либо причинам приводит к уменьшению крутизны проходной динамической характеристики усилительного элемента автогенератора, и, как следствие, уменьшается и сама амплитуда колебаний. И наоборот, уменьшение амплитуды колебаний, например, вследствие уменьшения температуры окружающей среды, вызывает увеличение этой крутизны благодаря соответствующему изменению автосмещения, что восстанавливает первоначальную стационарную амплитуду колебаний. Регулирование крутизны нелинейной характеристики усилительного элемента осуществляется изменением автосмещения, которое пропорционально квадрату амплитуды и к тому же является безынерционным. Последнее обстоятельство приводит к гораздо более быстрой стабилизации амплитуды колебаний, чем в распространенном в настоящее время автогенераторе с автоматическим смещением с использованием RC – цепи и других.

В данной работе проходная динамическая характеристика усилительного элемента автогенератора аппроксимируется полиномом четвертой степени. Это не всегда позволяет решить вопрос об устойчивости равновесия режима, при котором амплитуда колебаний равна нулю, в случае работы автогенератора с отсечкой тока, то есть в режиме колебаний второго рода. Дальнейшее использование такого автогенератора в составе фазогенераторного преобразователя, то есть в режиме синхронизации, делает исследование вышеуказанного состояния равновесия излишним.

Регулирование крутизны нелинейной характеристики усилительного элемента осуществляется изменением автосмещения, которое пропорционально квадрату амплитуды и к тому же является безынерционным. Последнее обстоятельство приводит к гораздо более быстрой стабилизации амплитуды колебаний, чем в распространенном в настоящее время автогенераторе с автоматическим смещением с использованием RC – цепи.

Проведенное исследование одноконтурного LC – автогенератора с квадратичным безынерционным автосмещением подтвердило возможность существования устойчивых колебаний, регулировки их амплитуды в широких пределах и высокой их стабильности.

Список литературы: 1. *Арш Э.И.* Автогенераторные измерения. М. Энергия, 1976. 135 с. 2. *Полулях К.С.* Резонансные методы измерений. М. Энергия, 1980. 120 с. 3. *Рапин В.В.* Аппроксимация проходных динамических характеристик усилительных элементов LC - автогенераторов// Радиоэлектроника. 1988. Т. 31, № 5. С. 77 – 79 (Изв. высш. учебн. заведений).

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 27.10.2003