

зависимости плотности транспортного потока от изменения ФС водителей грузовых автомобилей.

Список литературы: 1.Мишурин, В. М. Психофизиологические основы труда водителей автомобилей : учеб. пособие / В. М. Мишурин, А. Н. Романов, Н. А. Игнатов. — М. : МАДИ, 1982. — 254 с.2.Печерский, М. П. Автоматизированные системы управления дорожным движением в городах / М. П. Печерский, Б. Г. Хорович. — М. : Транспорт, 1979. — 176 с.3.Дрю, Д. Теория транспортных потоков и управление ими : пер. с англ. — М. : Транспорт, 1972. — 423 с.4.Брайловский, Н. О. Моделирование транспортных систем / Н. О. Брайловский, Б. И. Грановский. — М. : Транспорт, 1978. — 125 с.5.Брайловский, Н. О. Управление движением транспортных средств / Н. О. Брайловский, Б. И. Грановский. — М. : Транспорт, 1975. — 112 с.6.Давідіч, Ю. О. Проектування автотранспортних технологічних процесів з урахуванням психофізіології водія / Ю. О. Давідіч. — Харків : ХНАДУ, 2006. — 292 с.7.Бабков, В. Ф. Дорожные условия и режимы движения автомобилей / В. Ф. Бабков, М. Б. Афанасьев, А. П. Васильев. — М. : Транспорт, 1967. — 227 с.8. Гюлев, Н.У. К вопросу о зависимости функционального состояния водителя от его индивидуально – типологических свойств / Н.У. Гюлев // Комунальне господарство міст: науково-технічний збірник. — Х.: ХНАМГ, 2011. — Вип. 97. — с. 314–319.9.Гюлев, Н.У. Об изменении времени реакции водителя вследствие пребывания в транспортном заторе / Н. У. Гюлев // Вестник Национального технического университета «ХПИ». — 2011. — №2. — С. 117–120.10.Хомяк, Я. В. Организация дорожного движения / Я. В. Хомяк. — К. : Вища школа, 1986. — 271 с.11.Клинковштейн, Г. И. Организация дорожного движения / Г. И. Клинковштейн, М. Б. Афанасьев. — М. : Транспорт, 2001. — 247 с.12.Системологія на транспорті : підручник у 5 кн. / під заг. ред. Дмитриченка М.Ф.– кн.IV: Організація дорожнього руху / Е.В.Гаврилов, М.Ф. Дмитриченко, В.К.Доля та ін. — К. : Знання України, 2007 р. — 452 с.13.Автомобильные перевозки и организация дорожного движения: справочник. пер. с англ. / В.У. Рэнкин, П. Клафи, С. Халберт и др. — М. : Транспорт, 1981. — 592 с.14.Романов, А. Г. Дорожные условия в городах: закономерности и тенденции / А. Г. Романов. — М. : Транспорт, 1984. — 80 с.15.Бабков, В. Ф. Дорожные условия и безопасность движения / В. Ф. Бабков. — М. : Транспорт, 1982. — 288 с.16.Хейт, Ф. Математическая теория транспортных потоков : пер. с англ. — М. : Мир, 1966. — 288 с.17.Гюлев, Н.У. Влияние времени простоя автомобиля в дорожном заторе на функциональное состояние водителя / Н. У. Гюлев // Восточно-европейский журнал передовых технологий. — 2011. — Т.1/10(49). — С. 50–52.18.Гюлев, Н.У. Модель влияния транспортного затора на функциональное состояние водителя / Н. У. Гюлев // Восточно-европейский журнал передовых технологий. — 2011. — Т.2/6(50). — С. 73–75.19.Лобанов, Е. М. Проектирование дорог и организация движения с учетом психофизиологии водителя / Е. М. Лобанов. — М. : Транспорт, 1980. — 311 с.20.Баевский, Р. М. Математический анализ изменений сердечного ритма при стрессе / Р. М. Баевский, О. Н. Кириллов, С. З. Клецкин. — М. : Наука, 1984. — 222 с.21.Парин, В. В. Космическая кардиология / В. В. Парин, Р. М. Баевский, Ю. Н. Волков, О. Г. Газенко. — Ленинград : Медицина, 1967. — 206 с.

Поступила в редколлегию 15.01.2012

УДК 621.373.072.9

В.В. РАПИН, канд.техн.наук, доц., УИПА, Харьков,

А.И. ФЕДЮШИН, канд.техн.наук, доц., УИПА, Харьков

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИНХРОНИЗИРОВАННОГО АВТОГЕНЕРАТОРА

Представлено математичну модель синхронізованого автогенератора з фазовим оберненим зв'язком, яка бере до уваги вплив природнього шуму, та флуктуацій параметрів. Отримані рівняння мають бути використані для моделювання, як автогенераторів так і їх систем.

Ключові слова: автогенератор, синхронізація, фазовий обернений зв'язок, завадостійкість.

Представлена математическая модель синхронизированного автогенератора с фазовой обратной связью, учитывающая влияние естественных шумов и флуктуаций параметров. Полученные уравнения предназначены для моделирования, как отдельных автогенераторов, так и их систем.

Ключевые слова: автогенератор, синхронизация, фазовая обратная связь, помехоустойчивость.

This article represents mathematical model of synchronized oscillator with phase feedback, taking into account natural noises and fluctuation of the parameters. The obtained results intended for simulation of oscillators and their systems.

Key words: oscillator, synchronization, phase feedback, jam protection.

1. Введение

Синхронизированные автогенераторы широко используются в различных радиоэлектронных устройствах в радиотехнике, связи, информационно-измерительной технике, автоматике. Они позволяют выполнять такие операции как усиление АМ, ЧМ, ФМ сигналов, их детектирование, умножение и деление частоты, фазовую коррекцию, нелинейную фильтрацию и т.д. [1,2]. Дальнейшее совершенствование характеристик автогенераторных устройств привело к использованию в них фазовой обратной связи [3]. Это позволило в значительной мере реализовать потенциальные возможности синхронизированных автогенераторов. Однако влияние фазовой обратной связи на помехоустойчивость таких систем не исследована. Таким образом, целью статьи является разработка математической модели синхронизированного одноконтурного LC- автогенератора с фазовой обратной связью, которая бы позволяла моделировать функционирование его в разных режимах с учетом воздействия естественных шумов и флуктуаций крутизны.

2. Разработка математической модели

При синхронизации на основном тоне, рассмотрим автогенератор с трансформаторной обратной связью, представленный на рисунке 1.

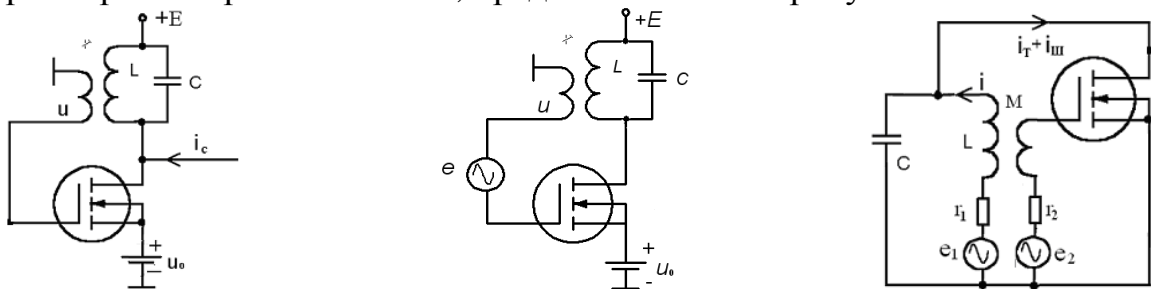


Рис.1. Схемы автогенераторов

а) синхронизация на основном тоне

б) режим умножения и деления частоты

в) эквивалентная схема автогенератора

Результаты, как известно, не изменятся существенно, если исходить из иной схемы одноконтурного автогенератора. Нелинейную характеристику усилительного элемента считаем безынерционной и при синхронизации на основном тоне аппроксимируем полиномом четвертой степени $i = a_0 + a_1u_y + a_2u_y^2 + a_3u_y^3 + a_4u_y^4$, где $u_y = u + u_0$ управляющее напряжение, u_0 -

смещение, а u - напряжение положительной обратной связи на входе усилительного элемента. Выражение $i_c = I_c \cos(\omega_c t + \psi)$ описывает непосредственный сигнал синхронизации. Исходный сигнал синхронизации представлен соотношением $i_c = I_c \cos(\omega_c t + \varphi_c)$. При исследовании воздействия естественных шумов на процесс синхронизации автогенератора будем исходить из эквивалентной схемы, представленной на рис. 1в.

Крутизна проходной динамической характеристики усилительного элемента автогенератора представлена в виде суммы детерминированной составляющей и флюктуационной $S = S_0 + S_\varphi$. Тогда на основании законов Кирхгофа можно записать основное уравнение одноконтурного автогенератора в виде

$$\frac{d^2 u}{d\tau^2} - \varepsilon \frac{d}{d\tau} \left\{ u - \beta u^2 - \gamma u^3 - \delta' u^4 - \frac{s_\varphi}{s_0} \left(\frac{s_0}{\alpha_0} u + \beta u^2 + \gamma u^3 + \delta' u^4 \right) \right\} + \frac{\omega_0^2}{\omega_c^2} u = \varepsilon \frac{KR}{\alpha} \frac{di_c}{d\tau} + E(\tau),$$

где

$$E(\tau) = \frac{M}{L} \frac{d^2 e_1}{d\tau^2} + M\omega_0 \frac{di_u}{d\tau} + \frac{d^2 e_2}{d\tau^2} + \frac{1}{Q} \frac{de_2}{d\tau} + e_2 - \text{выражение, описывающее шум,}$$

$\varepsilon = \delta_k \alpha$ - малый параметр; $\tau = \omega_c t$ - безразмерное время; $\alpha = (KR\alpha_0 - 1)$; $\beta = \beta_0 / \alpha_0'$; $\gamma = \gamma_0 / \alpha_0'$; $\delta = \delta_0 / \alpha_0'$; $\delta_0 = a_4$; $\alpha_0 = a_1 + 2a_2 u_0 + 3a_3 u_0^2 + 4a_4 u_0^3$; $\beta_0 = a_2 + 3a_3 u_0 + 6a_4 u_0^2$; $\gamma_0 = a_3 + 4a_4 u_0$; $\alpha_0' = -\alpha_0 + 1/(KR)$; $\delta_k = 1/Q$; ω_0, R, Q - резонансная частота контура автогенератора, его сопротивление и добротность, K - модуль коэффициента положительной обратной связи, M - взаимная индуктивность.

Учитывая высокую добротность контуров автогенераторов считаем амплитуду и фазу колебаний медленно меняющимися функциями времени. Решение вышеуказанных уравнений для квазигармонических автогенераторов, как известно, может быть найдено в виде $u = A \cos(\omega_c t + \varphi)$. Учет влияния фазовой обратной связи производится путем введения сдвига фазы сигнала автогенератора относительно внешнего сигнала синхронизации, т.е. $\theta = \varphi - \psi = k(\varphi - \varphi_c) = k\theta^0$, где параметр k характеризует фазовую обратную связь. Тогда, используя метод усреднения, можно получить укороченные уравнения

$$\frac{dy}{d\tau} + \frac{\varepsilon}{2} (y^3 - y) + \frac{\varepsilon}{2} \left(y^3 + \frac{s_0}{\alpha_0} y \right) \frac{s_\varphi}{s_0} = \frac{\varepsilon B}{2\alpha} \cos(k\theta^0) + \frac{1}{A_0} (e_{10}(\tau) \cos \varphi - e_{20}(\tau) \sin \varphi),$$

$$\frac{d\theta^0}{d\tau} + \frac{\varepsilon B}{2\alpha y} \sin(k\theta^0) = -\left(\frac{\Delta\omega}{\omega_0} \right) - \frac{d\varphi_c}{d\tau} - \frac{1}{A_0 y} (e_{10}(\tau) \sin \varphi - e_{20}(\tau) \cos \varphi),$$

где $y = A/A_0$ - безразмерная амплитуда колебаний; $A_0 = \sqrt{4\alpha_0' / (3\gamma_0)}$ - амплитуда колебаний в автономном режиме; A - амплитуда колебаний автогенератора в режиме синхронизации; $B = I_c / I_0$, $I_0 = A_0 / R$; $|d\varphi_c / d\tau| \ll 1$, $(\Delta\omega / \omega_0) = (\omega_c - \omega_0) / \omega_0 \ll 1$,

$$e_{10}(\tau) = -\frac{1}{2\pi} \int_{\tau}^{\tau+2\pi} E_{(v)j} \sin v dv, \quad e_{20}(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{\tau}^{\tau+2\pi} E_{(v)j} \cos v dv.$$

При работе синхронизированных одноконтурных автогенераторов в режимах умножения или деления частоты в них устанавливают режим колебаний второго рода. В связи с этим нелинейная характеристика усилительного элемента

автогенератора аппроксимируется полиномом пятой или шестой степени

$$i = a_0 + a_1 u_y + a_2 u_y^2 + a_3 u_y^3 + a_4 u_y^4 + a_5 u_y^5 + a_6 u_y^6,$$

где $u_y = u + e + u_0$, u_0 - фиксированное смещение, $e = E \cos(\omega_c t + \psi)$ - непосредственный сигнал синхронизации. Исходный сигнал синхронизации представлен соотношением $e_c = E_c \cos(\omega_c t + \varphi_c)$. Считаем, что контур автогенератора имеет высокую добротность, а амплитуда и фаза колебаний являются медленно меняющимися функциями. Тогда решением вышеприведенного уравнения, как известно, является выражение $u = A \cos(\omega_c t + \varphi)$, где $\omega_c = m/n\omega_0$ - частота генерирования. По аналогии с предыдущими случаями, можно получить укороченные уравнения для малых сигналов синхронизации в виде

$$\begin{aligned} \frac{dy}{d\tau} + \frac{\varepsilon}{2}(b_0 y^5 + b_1 y^3 + b_2 y) &= \frac{\varepsilon}{2} B_{1(y)} \cos(k\theta^0) + \frac{1}{A_0} (e_{10(\tau)} \cos - e_{20(\tau)} \sin \varphi), \\ \frac{d\theta^0}{d\tau} + n \frac{\varepsilon}{2} B_{2(y)} \sin(k\theta^0) &= -n \left(\frac{\Delta\omega}{\omega_0} \right) - m \frac{d\varphi_c}{d\tau} - \frac{1}{A_0 y} (e_{10(\tau)} \sin \varphi - e_{20(\tau)} \cos \varphi), \end{aligned} \quad (1)$$

где

$$m \text{ и } n - \text{небольшие неравные целые числа, } (\Delta\omega/\omega_0) = (m/n\omega_c - \omega_0)/\omega_0 \ll 1, \\ \theta^0 = n\varphi - m\varphi_c.$$

Выражения для коэффициентов B , входящих в полученные уравнения, существенным образом зависят от режима работы синхронизированного автогенератора.

Например, при умножении частоты в два раза, $n = 1$, $m = 2$, они имеют вид:

$$\begin{aligned} B_{1(y)} &= B_1 + B_2 y^2 + B_3 y^4, & B_{2(y)} &= -(B_4/y + B_5 y + B_6 y^3), \\ B_1 = -B_4 &= -\frac{E^2}{2A_0} (\beta + \delta E^2 + 15/16 g E^4), & B_2 &= -\frac{9}{4} E^2 A_0 (\delta + 5/2 g E^2), & B_3 &= -\frac{75}{16} g E^2 A_0^3, \\ B_5 &= \frac{3}{4} E^2 A_0 (\delta + 5/2 g E^2), & B_6 &= \frac{15}{16} g E^2 A_0^3. \end{aligned}$$

Для режима умножения на три, $n = 1$, $m = 3$ меняются следующие коэффициенты, $B_{1(y)} = -(B_1 + B_2 y^2)$, $B_{2(y)} = -(B_3/y + B_4 y)$, $B_2 = B_4 = 15 f E^3 A_0 / 8$, $B_1 = B_3 = E^3 (\gamma + 5/4 f E^2) / (4 A_0)$.

Для режима деления на два, $n = 2$, $m = 1$, $B_{1(y)} = -(B_1 y + B_2 y^3 + B_3 y^5)$, $B_{2(y)} = -(B_4 + B_5 y^2)$, $B_1 = B_4 = (\frac{3}{2} \delta E^2 + \beta) E$, $B_2 = E (2\delta + 15/2 g E^2) A_0^2$, $B_3 = 15/4 g E A_0^4$, $B_5 = E (\delta + 45/8 g E^2) A_0^2$.

В случае режима деления на три, $n = 3$, $m = 1$, $B_{1(y)} = -(B_1 y^2 + B_2 y^4)$, $B_{2(y)} = -(B_3 y + B_4 y^3)$. $B_1 = B_3 = 3E (\gamma + 5 f E^2 / 2) A_0 / 4$, $B_2 = 25 f E A_0^3 / 16$, $B_4 = 15 f E A_0^3 / 16$.

В вышеприведенные соотношения входят также выражения

$$b_0 = \frac{5}{8} f A_0^4, \quad b_1 = \frac{3}{4} A_0^2 (5 f E^2 + \gamma), \quad b_2 = -1 + \frac{3}{2} \gamma E^2 + \frac{15}{8} f E^4; \quad \beta = \beta_0 / \alpha_0', \quad \gamma_j = \gamma_{0j} / \alpha_{0j}'$$

$$\delta = \delta_0 / \alpha_0, \quad f = f_0 / \alpha_0, \quad g = g_0 / \alpha_0, \quad \alpha_0 = a_1 + 2a_2u_0 + 3a_3u_0^2 + 4a_4u_0^3 + 5a_5u_0^4 + 6a_6u_0^5,$$

$$\beta_0 = a_2 + 3a_3u_0 + 6a_4u_0^2 + 10a_5u_0^3 + 15a_6u_0^4, \quad \delta_0 = a_4 + 5a_5u_0 + 15a_6u_0^2 \quad f_0 = a_5 + 6a_6u_0 \quad g_{0j} = a_{6j}$$

$$\gamma_0 = a_3 + 4a_4u_0 + 10a_5u_0^2 + 20a_6u_0^3.$$

Уравнения (1) с соответствующими коэффициентами и являются математической моделью синхронизированного одноконтурного LC-автогенератора, работающего в режиме умножения и деления частоты. Ввиду малых непосредственных сигналов синхронизации $|B_{1(y)}| \ll 1$, и $|B_{2(y)}| \ll 1$

Все разнообразие полученных укороченных уравнений автогенератора, как при синхронизации на основном тоне так и в режимах умножения и деления частоты можно представить в общем виде.

$$\frac{dy}{d\tau} + \frac{\varepsilon}{2} B_{0(y)} = \frac{\varepsilon}{2} B_{1(y)} \cos k\theta^0 + \frac{\varepsilon}{2} B_{s(y)} \frac{s\phi}{s_0} + \frac{1}{A_{0j}} (e_{10(\tau)} \cos \varphi - e_{20(\tau)} \sin \varphi),$$

$$\frac{d\theta^0}{d\tau} + n \frac{\varepsilon}{2} B_{2(y)} \sin k\theta^0 = -n \left(\frac{\Delta\omega}{\omega_0} \right) - m \frac{d\varphi_c}{d\tau} - \frac{1}{A_{0y}} (e_{10(\tau)} \sin \varphi - e_{20(\tau)} \cos \varphi).$$

Эти уравнения и являются обобщенной математической моделью синхронизированных автогенераторов с фазовой обратной связью.

3. Эксперимент

Проверка полученных теоретических соотношений заключалась в определении различий между реальной амплитудой колебаний и полученной в результате численного решения укороченных уравнений для экспериментального автогенератора. Решение проводилось методом Рунге-Кутты четвертого порядка. Исследовался синхронизированный на основном тоне автогенератора с параметрами $f_0 = 50 \text{ kHz}$, $\varepsilon = 1.7 \times 10^{-3}$, $R = 7.5 \text{ k}\Omega$, $u_0 = -1 \text{ V}$, $K = 0.16$, $I_c = 8 \mu\text{A}$,

$\delta = 0.0213$, $B/\alpha = 0.133$. Проходная динамическая характеристика его усилительного элемента аппроксимировалась полиномом

$$i = 1.538 + 1.302u_c - 0.356u_c^2 - 0.502u_c^3 - 0.098u_c^4$$

мА. Различие между теорией и экспериментом в полосе синхронизации представлено на рис. 2.

Легко видеть хорошее совпадение теоретических и экспериментальных данных. Это означает достаточно малую погрешность разработанных математических моделей.

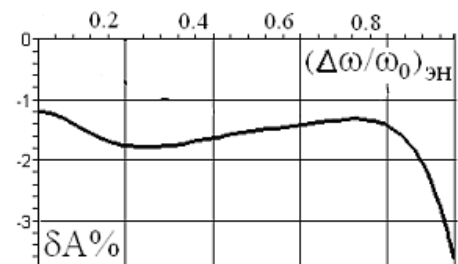


Рис. 2. Несоответствие расчетных и экспериментальных данных

Список литературы: 1. *Kaushik Sengupta, T. K. Bhattacharyya, Hossein Hashemi*, A Nonlinear Transient Analysis of Regenerative Frequency Dividers// IEEE Transactions. Circuits and Systems, 2007, CAS-54, № 12, p.2646-2660. 2. *Геллер Л.Я.* Усилительные свойства автоколебательной системы, находящейся под действием амплитудно-модулированного сигнала // Вопросы радиоэлектроники, сер. "Техника радиосвязи". -1972. -№5. -С. 145-150. 3. *Rapin. V.* Synchronized oscillators with the phase negative feedback// IEEE Transactions. Circuits and Systems, 2002, CAS-49, № 8, p.1242-1245.

Поступила в редколлегию 15.01.2012