

Динамика синхронизации двухкаскадного генератора ван дер Поля

В.В. Зайцев¹, А.В. Карлов²

¹ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева
443086, Россия, г. Самара,
Московское шоссе, 34

² Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики
443010, Россия, г. Самара,
ул. Л. Толстого, 23

Аннотация – Представлены результаты численного моделирования процесса синхронизации автоколебаний в двухкаскадном кольцевом генераторе ван дер Поля гармоническим сигналом. Исследования проведены в рамках ДВ-модели динамической системы. Модель разработана на основе принципа соответствия в рамках метода медленно меняющихся амплитуд характеристик дискретной системы характеристикам аналогового прототипа. Получены укороченные уравнения для комплексных амплитуд колебаний в каскадах генератора. Установлено, что в автономной системе наблюдается эффект бистабильности амплитуд. В режиме синхронизации внешним гармоническим сигналом решения укороченных уравнений позволили рассчитать амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики синхронных колебаний. Показано, что в полосе удержания синхронных колебаний наблюдаются переходы между бистабильными состояниями. Проанализированы различия частотных характеристик синхронизации классического и двухкаскадного осцилляторов ван дер Поля.

Ключевые слова – автоколебания; осциллятор ван дер Поля; кольцевой генератор; фазовая синхронизация; дискретное время; разностные уравнения движения; медленные амплитуды; частотные характеристики.

Введение

Модели в форме взаимосвязанных осцилляторов (активных и консервативных) находят достаточно широкое применение. Причем они используются как для исследования реально существующих объектов [1–3], так и для обнаружения и изучения новых физических эффектов [4–6].

Одним из способов взаимосвязи осцилляторов является их кольцевое соединение. При этом в кольцевом генераторе (КГ) цепь положительной обратной связи, обеспечивающей генерацию, существует лишь при замыкании кольца активных ячеек, каждая из которых обратной связи не содержит и не является самогенерирующей. Было показано [7], что КГ позволяет получить сигнал с повышенной долговременной стабильностью частоты по сравнению с автогенератором, реализованным на отдельно взятой ячейке. В статье [8] рассмотрен вариант КГ – кольцо из двух резонансных ячеек (каскадов) с кубически нелинейными активными трехполосниками. Этот вариант КГ назван двухкаскадным генератором (осциллятором) ван дер Поля. Исследованы характеристики его автономных колебаний. В настоящем сообщении рассматривается режим синхронизации этого генератора внешним гармоническим сигналом. Исследование проведено в рамках дискретно-временной (ДВ) модели динамической системы.

1. ДВ-модель генератора

Структурная схема двухкаскадного генератора ван дер Поля приведена на рис. 1.

Приняв в качестве математической модели осциллятора ван дер Поля с внешним воздействием $E(t)$ уравнение движения вида

$$\frac{d^2 y_1}{dt^2} + \frac{\omega_0}{Q} \frac{dy_1}{dt} + \omega_0^2 y_1 = p \frac{\omega_0}{Q} (1 - y_1^2) \frac{dy_1}{dt} + \omega_0^2 E(t), \quad (1)$$

получим модель двухкаскадного генератора с идентичными ячейками в форме системы дифференциальных уравнений

$$\frac{d^2 y_1}{dt^2} + \frac{\omega_0}{Q} \frac{dy_1}{dt} + \omega_0^2 y_1 = p \frac{\omega_0}{Q} (1 - y_1^2) \frac{dy_1}{dt} + \omega_0^2 E(t), \quad (2)$$
$$\frac{d^2 y_2}{dt^2} + \frac{\omega_0}{Q} \frac{dy_2}{dt} + \omega_0^2 y_2 = p \frac{\omega_0}{Q} (1 - y_1^2) \frac{dy_1}{dt}.$$

В уравнениях (1) и (2) осциллирующие переменные y_k нормированы на характерный масштаб нелинейности, ω_0 и Q – собственные частоты добротности резонаторов ячеек, p – параметр превышения порога генерации.

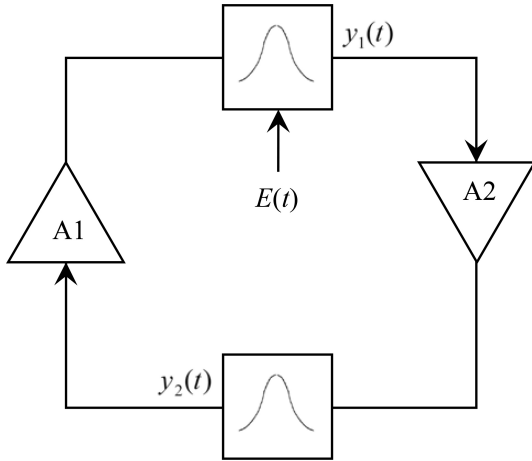


Рис. 1. Структурная схема двухкаскадного осциллятора ван дер Поля
 Fig. 1. Block diagram of a two-stage van der Pol oscillator

Предполагая в дальнейшем дискретизацию времени с интервалом Δ , введем в уравнения (2) безразмерную временную переменную $\tau = t / \Delta$:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 y_1}{dt^2} + 2\pi\nu \frac{dy_1}{dt} + 4\pi^2 \Omega_0^2 y_1 &= \\ = 2\pi\nu p \left(1 - y_2^2\right) \frac{dy_2}{dt} + 4\pi^2 \Omega_0^2 E(t), & \\ \frac{d^2 y_2}{dt^2} + 2\pi\nu \frac{dy_2}{dt} + 4\pi^2 \Omega_0^2 y_2 &= \\ = 2\pi\nu p \left(1 - y_1^2\right) \frac{dy_1}{dt}. & \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь $\Omega_0 = \omega_0 / \omega_d$ – собственная частота, измеряемая в единицах частоты дискретизации $\omega_d = 2\pi / \Delta$; $\nu = \Omega_0 / Q$ – полоса резонатора.

Переход к дискретному времени в (3) проведем методом работы [9]. Для осцилляций $y_1[n] = y_1(\tau_n)$ и $y_2[n] = y_2(\tau_n)$ получим систему нелинейных разностных уравнений:

$$\begin{aligned} y_1[n] - 2\delta \cos(2\pi\Omega_0) y_1[n-1] + \delta^2 y_1[n-2] &= \\ = 2\pi\nu p D(y_2[n-1], y_2[n-2]) + & \\ + 2\pi\Omega_0 \delta \sin(2\pi\Omega_0) E[n-1], & \\ y_2[n] - 2\delta \cos(2\pi\Omega_0) y_2[n-1] + \delta^2 y_2[n-2] &= \\ = 2\pi\nu p D(y_1[n-1], y_1[n-2]), & \end{aligned} \quad (4)$$

где $D(y[n-1], y[n-2]) = (1 - y^2[n-1]) (\cos(2\pi\Omega_0) y[n-1] - y[n-2])$ – нелинейности ячеек, $\delta = \exp(-\pi\nu)$ – параметр диссипации резонатора.

Систему уравнений (4) можно рассматривать с двух точек зрения. С одной из них, при выполнении

условия $\Omega_0 \ll 1$ – это разностная схема для расчета автоколебаний в исследуемом генераторе. С другой, соотношения (4) определяют дискретное отображение двухкаскадного кольцевого осциллятора – динамическую систему, функционирующую в дискретном времени. Такие объекты нелинейной динамики на частотах Ω_0 порядка частоты Найквиста вследствие эффекта подмены частот [10] демонстрируют свойства, не наблюдаемые в непрерывном времени [11].

2. Укороченные уравнения метода ММА

Синхронные автоколебания [12; 13] в области удержания представим в форме осцилляций с медленно меняющимися комплексными амплитудами $A_1[n]$ и $A_2[n]$:

$$y_{1,2}[n] = \frac{1}{2} A_{1,2}[n] Z^n + \frac{1}{2} A_{1,2}^*[n] Z^{-n}, \quad (5)$$

где $Z = \exp(j2\pi\Omega)$ – функция частоты внешнего. Метод медленно меняющихся амплитуд (метод ММА) широко используется при решении прикладных задач теории нелинейных колебаний в непрерывном времени [14; 15]. Особенности его применения к нелинейным ДВ-системам представлены, например, в [11]. В частности, условием медленности изменения амплитуд $A_k[n]$ являются приближенные равенства $A_k[n] - A_k[n-1] = A_k[n-1] - A_k[n-2]$.

В рамках метода ММА для амплитуд автоколебаний в ячейках ДВ-осциллятора (4) при внешнем гармоническом воздействии с амплитудой E_0 и частотой Ω удастся получить систему укороченных уравнений вида

$$\begin{aligned} A_1[n] &= A_1[n-1] - \pi\nu(1 + j\eta) A_1[n-1] + \\ + \pi\nu p \left(1 - \frac{1}{4} |A_2[n-1]|^2\right) A_2[n-1] - j\pi\Omega_0 E_0, & \\ A_2[n] &= A_2[n-1] - \pi\nu(1 + j\eta) A_2[n-1] + \\ + \pi\nu p \left(1 - \frac{1}{4} |A_1[n-1]|^2\right) A_1[n-1], & \end{aligned} \quad (6)$$

где введено обозначение $\eta = 2(\Omega - \Omega_0) / \nu$ для приведенной частоты сигнала синхронизации, а также использовано высокодобротное приближение для параметра диссипации: $\delta = 1 - \pi\nu$. Отметим, что для автономного осциллятора ($E_0 = 0$, $\Omega = \Omega_0$) укороченные уравнения (6) совпадают с соответствующими уравнениями статьи [8].

В режиме установившихся колебаний в полосе удержания система разностных уравнений (6)

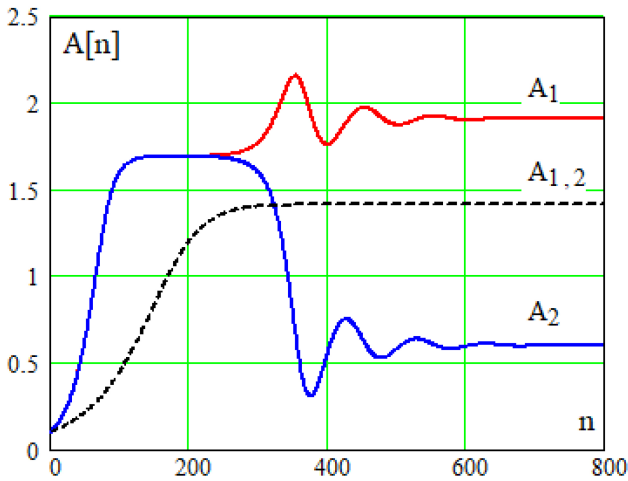


Рис. 2. Процесс установления автоколебаний
Fig. 2. Process of establishing self-oscillations

сводится к системе нелинейных алгебраических уравнений

$$\begin{aligned} v(1+j\eta)A_1 - vp\left(1 - \frac{1}{4}|A_2|^2\right)A_2 &= -j\Omega_0 E_0, \\ v(1+j\eta)A_2 - vp\left(1 - \frac{1}{4}|A_1|^2\right)A_1 &= 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Решение системы четырех действительных нелинейных уравнений (7) – технически непростая задача. Значительно проще получить решение укороченных уравнений (6) при квазистатическом изменении частоты Ω . Полученные при этом зависимости $A_{1,2}(\Omega)$ будут близки к статическим частотным характеристикам.

3. Результаты моделирования автоколебаний

Хорошо известно (см., например, [16]), что траектория движения автономного осциллятора (1) при выполнении условия самовозбуждения $p > 1$ выходит на единственный предельный цикл. Решения укороченных уравнений (6) позволяют сделать вывод о том, что для кольцевого осциллятора (2) такое поведение характерно лишь в интервале значений параметра $1 < p < 2$. При более высоких уровнях возбуждения в каскадах устанавливаются автоколебания с различающимися амплитудами [8]. Рис. 2 иллюстрирует этот эффект бистабильности для $p = 3,5$. Пунктирная линия на рисунке отображает динамику амплитуд автоколебаний в каскадах при $p = 1,99$.

Большее значение амплитуды автоколебаний достигается в каскаде с наибольшим значением начального возмущения $A_i[0]$ состояния нулевого равновесия. Если параметры каскадов различают-

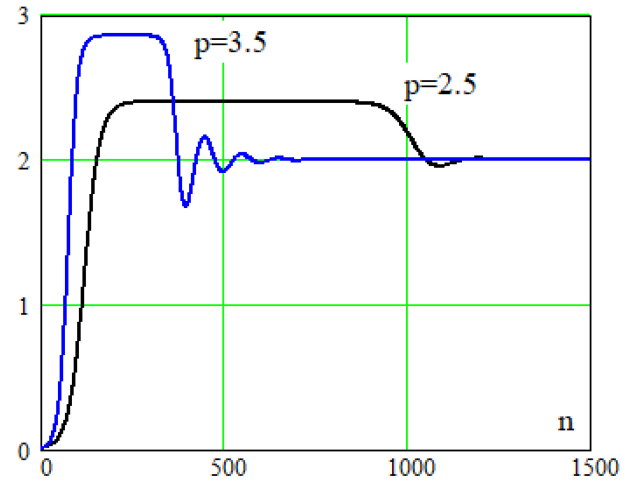


Рис. 3. Динамика суммарной мощности автоколебаний
Fig. 3. Dynamics of the total power of self-oscillations

ся, то наибольшее значение амплитуды устанавливается в каскаде с наименьшей добротностью.

Синфазность колебаний в каскадах позволяет проводить суммирование их мощностей:

$$W[n] = \frac{1}{2}A_1^2[n] + \frac{1}{2}A_2^2[n].$$

На рис. 3 представлены временные зависимости суммарной мощности $W[n]$ для двух уровней возбуждения $p = 2,5$ и $p = 3,5$. Характерной особенностью является стремление $W[n] \rightarrow 2$ для всех значений $p > 2$. При этом время достижения предела уменьшается с ростом уровня возбуждения.

Частотные характеристики синхронного режима колебаний в двухкаскадном генераторе (2) приведем в сравнении с аналогичными характеристиками классического генератора ван дер Поля (1). Приближенные решения системы уравнений (7) получены как решения укороченных уравнений (6) при квазистатическом изменении частоты Ω синхронизирующего сигнала.

На рис. 4 представлены амплитудно-частотные (а) и фазочастотные (б) характеристики синхронных колебаний в генераторе (1) с параметрами $\Omega_0 = 0,1$, $Q = 20$, $p = 1,5$ при амплитуде синхросигнала $E_0 = 0,05$. Представленные зависимости $A(\eta)$ и $\varphi(\eta)$ полностью соответствуют приведенным, например, в [17].

Характеристики синхронных колебаний двухкаскадного кольцевого генератора (2), рассчитанные для тех же значений параметров, показаны на рис. 5. АЧХ колебаний в первом (находящемся под внешним воздействием) и втором каскадах (рис. 5, а) различаются кардинально. Несмотря на то что при $p = 1,5$ в автономной системе бистабильность амплитуд не наблюдается, под действи-

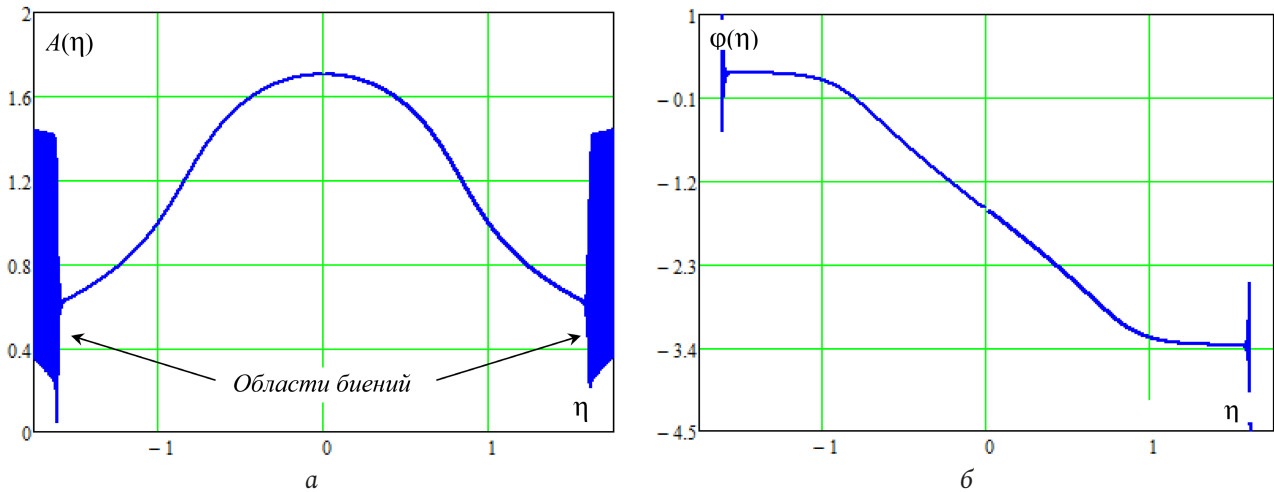


Рис. 4. Частотная характеристика синхронизации осциллятора (1)
 Fig. 4. Frequency response of the oscillator synchronization (1)

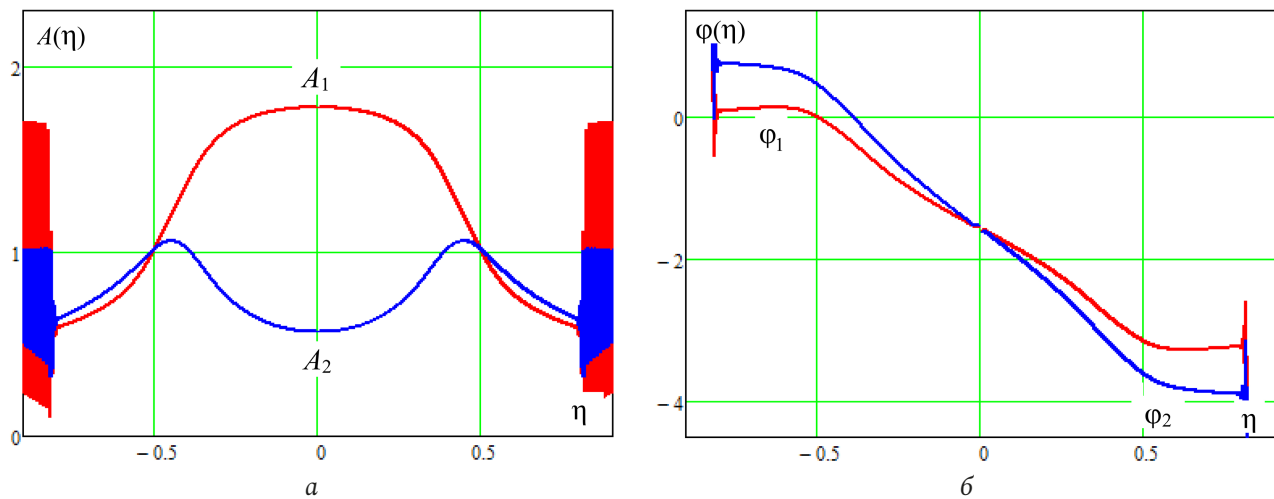


Рис. 5. Частотная характеристика синхронизации осциллятора (2): $p = 1,5$, $E_0 = 0,05$
 Fig. 5. Frequency response of oscillator synchronization (2): $p = 1,5$, $E_0 = 0,05$

ем внешнего сигнала в каскадах устанавливается режим синхронных колебаний с различными амплитудами. Причем в центре полосы синхронизации (полосы удержания) амплитуда в первом каскаде выше, чем во втором. Но это соотношение амплитуд плавно меняется при приближении к границам полосы. ФЧХ синхронных колебаний в одно- и двухкаскадном генераторах (рис. 4, б и рис. 5, б), а также колебаний в первом и втором каскадах качественно различаются незначительно.

Следует отметить, что полоса синхронизации (удержания) двухкаскадного генератора (2) при прочих равных существенно меньше полосы синхронизации генератора (1).

Эффект бистабильности амплитуд в автономном двухкаскадном генераторе (2), наблюдаемый при уровнях возбуждения $p > 2$, существенным образом сказывается на частотных характеристиках синхронизированных колебаний. На рис. 6 по-

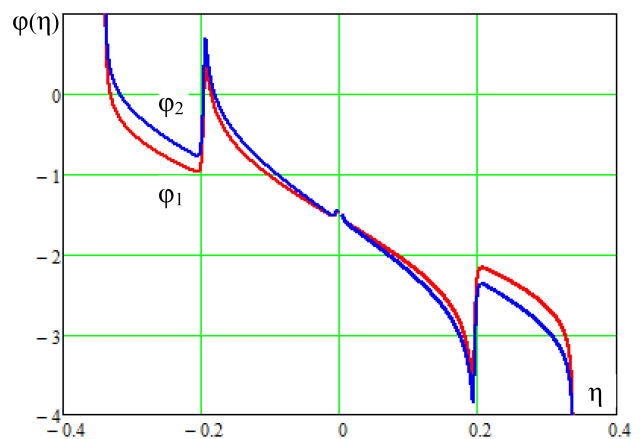


Рис. 6. Частотная характеристика синхронизации осциллятора (2): $p = 2,5$, $E_0 = 0,03$
 Fig. 6. Frequency response of oscillator synchronization (2): $p = 2,5$, $E_0 = 0,03$

казаны АЧХ (а) и ФЧХ (б) колебаний при превышении порога возбуждения $p = 2,5$ и амплитуде

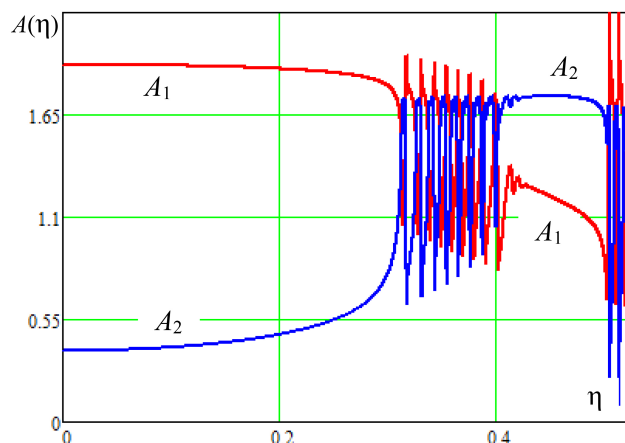


Рис. 7. АЧХ синхронизации осциллятора (2): $p = 2,5$, $E_0 = 0,05$
Fig. 7. Frequency response of synchronization of the oscillator (2):
 $p = 2,5$, $E_0 = 0,05$

синхронизации $E_0 = 0,03$. Из рис. 6, а следует, что в каждом из каскадов могут реализоваться режимы колебаний как с высоким, так и с низким уровнем амплитуды. Смена режимов при плавном изменении частоты синхронизации осуществляется скачком.

В окрестностях частот скачков могут наблюдаться области биений, как это показано на рис. 7

с АЧХ синхронизированных колебаний под действием сигнала с амплитудой $E_0 = 0,05$. При этом область синхронизации (удержания) распадается на три подобласти – центральную и две боковых (на рис. 7 показаны только половины симметричных графиков).

Отметим также, что особенностью двухкаскадного генератора является более плоская форма центральной части графика $A_1 = A_1(\eta)$ (рис. 6 и 7) по сравнению с аналогичным графиком для классического генератора ван дер Поля (рис. 4).

Заключение

Представленная ДВ-модель синхронизированного двухкаскадного генератора ван дер Поля позволяет анализировать частотные характеристики колебаний в полосе удержания, форму биений в ее окрестности, процессы захвата и срыва синхронизации. Модель легко обобщается на кольцевые структуры с произвольным числом ячеек, в частности на кольцевые лазеры. Дискретное время дает возможность учета запаздывания при распространении сигнала между каскадами.

Список литературы

1. Уткин Г.М. Автоколебательные системы и волновые усилители. М.: Сов. радио, 1978. 272 с.
2. Mazzanti A., Svelto F. A 1.8-GHz injection-locked quadrature CMOS VCO with low phase noise and high phase accuracy // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. 2006. Vol. 56, no. 3. P. 554-560. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCSI.2005.858161>
3. Кочемасов Д.В., Кулешов В.Н. ФМ и АМ-шумы кольцевых LC-АГКК с фазирующими RC-цепями // Электросвязь. 2015. № 5. С. 34-37.
4. Спротт Дж.К. Элегантный хаос: алгебраически простые потоки. М.; Ижевск: Ижевский институт компьютерных исследований, 2012. 328 с.
5. Многоликий хаос / Е.Ф. Мищенко [и др.]. М.: Физматлит, 2013. 432 с.
6. Корниенко В.Н., Привезенцев А.П. Возбуждение волн круглой мембраны ансамблем автогенераторов // Радиотехника и электроника. 2010. Т. 55, № 3. С. 362-368.
7. Зайцев В.В. К анализу флуктуаций в кольцевом автогенераторе // Известия вузов. Радиофизика. 1981. Т. 24, № 2. С. 207-212. URL: <https://radiophysics.unn.ru/issues/1981/2/207>
8. Зайцев В.В., Линдт С.В., Стулов И.В. Динамика автоколебаний в двухкаскадном осцилляторе Ван дер Поля // Вестник СамГУ. Естественнонаучная серия. 2013. Вып. 6 (107). С. 141-146. URL: <http://vestniksamsu.ssau.ru/index.php?c=issueArticle&articleId=532&issueId=19&serieId=1>
9. Зайцев В.В. Физически обоснованная дискретизация времени в математических моделях генераторов регулярных и хаотических колебаний // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2019. Т. 22, № 3. С. 44-48. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2019.22.3.44-48>
10. Опенгейм А., Шафер Р. Цифровая обработка сигналов. М.: Техносфера, 2006. 858 с.
11. Зайцев В.В., Стулов И.В. О влиянии подмененных гармоник на динамику автоколебаний в дискретном времени // Известия вузов. ПНД. 2015. Т. 23, вып. 6. С. 40-46. DOI: <https://doi.org/10.18500/0869-6632-2015-23-6-40-46>
12. Пиковский А., Розенблюм М., Куртс Ю. Синхронизация. Фундаментальное нелинейное явление. М.: Техносфера, 2003. 496 с.
13. Блехман И.С. Синхронизация в природе и технике. М.: Наука, 1981. 352 с.
14. Капранов М.В., Кулешов В.Н., Уткин Г.М. Теория колебаний в радиотехнике. М.: Наука, 1984. 320 с.
15. Найфе А. Введение в методы возмущений. М.: Мир, 1984. 535 с.
16. Рабинович М.И., Трубецков Д.И. Введение в теорию колебаний и волн. М.: Наука, 1984. 432 с.
17. Ланда П.С. Автоколебания в системах с конечным числом степеней свободы. М.: Наука, 1980. 360 с.

References

1. Utkin G.M. *Self-Oscillating Systems and Wave Amplifiers*. Moscow: Sov. radio, 1978, 272 p. (In Russ.)
2. Mazzanti A., Svelto F. A 1.8-GHz injection-locked quadrature CMOS VCO with low phase noise and high phase accuracy. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2006, vol. 56, no. 3, pp. 554–560. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCSI.2005.858161>
3. Kochemasov D.V., Kuleshov V.N. FM and AM noise of ring LC-AGKK with phasing RC-circuits. *Elektrosvjaz'*, 2015, no. 5, pp. 34–37. (In Russ.)
4. Sprott J.K. *Elegant Chaos: Algebraically Simple Streams*. Moscow, Izhevsk: Izhevskij institut komp'juternyh issledovanij, 2012, 328 p. (In Russ.)
5. Mischenko E.F. et al. *Many-Sided Chaos*. Moscow: Fizmatlit, 2013, 432 p. (In Russ.)
6. Kornienko V.N., Privezentsev A.P. Excitation of waves of a circular membrane by an ensemble of autogenerators. *Radiotekhnika i elektronika*, 2010, vol. 55, no. 3, pp. 362–368. (In Russ.)
7. Zaitsev V.V. To the analysis of fluctuations in a ring oscillator. *Izvestija vuzov. Radiofizika*, 1981, vol. 24, no. 2, pp. 207–212. URL: <https://radiophysics.unn.ru/issues/1981/2/207> (In Russ.)
8. Zaitsev V.V., Lindt S.V., Stulov I.V. The dynamics of self-oscillations in a two-stage van der Pol oscillator. *Vestnik SamGU. Estestvennonauchnaja serija*, 2013, no. 6 (107), pp. 141–146. URL: <http://vestniksamsu.ssau.ru/index.php?c=issueArticle&articleId=532&issueId=19&serieId=1> (In Russ.)
9. Zaitsev V.V. Physically substantiated discretization of time in mathematical models of generators of regular and chaotic oscillations. *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, 2019, vol. 22, no. 3, pp. 44–48. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2019.22.3.44-48> (In Russ.)
10. Opejnejm A., Shafer R. *Digital Signal Processing*. Moscow: Tehnosfera, 2006, 858 p. (In Russ.)
11. Zaitsev V.V., Stulov I.V. On the influence of substituted harmonics on the dynamics of self-oscillations in discrete time. *Izvestija vuzov. PND*, 2015, vol. 23, no. 6, pp. 40–46. DOI: <https://doi.org/10.18500/0869-6632-2015-23-6-40-46> (In Russ.)
12. Pikovskij A., Rozenbljum M., Kurts Yu. *Synchronization. Fundamental Nonlinear Phenomenon*. Moscow: Tehnosfera, 2003, 496 p. (In Russ.)
13. Blehman I.S. *Synchronization in Nature and Technology*. Moscow: Nauka, 1981, 352 p. (In Russ.)
14. Kapranov M.V., Kuleshov V.N., Utkin G.M. *Oscillation Theory in Radio Engineering*. Moscow: Nauka, 1984, 320 p. (In Russ.)
15. Najfe A. *Introduction to Perturbation Methods*. Moscow: Mir, 1984, 535 p. (In Russ.)
16. Rabinovich M.I., Trubetskov D.I. *Introduction to the Theory of Vibrations and Waves*. Moscow: Nauka, 1984, 432 p. (In Russ.)
17. Landa P.S. *Self-Oscillations in Systems with a Finite Number of Degrees of Freedom*. Moscow: Nauka, 1980, 360 p. (In Russ.)

Physics of Wave Processes and Radio Systems 2021, vol. 24, no. 3, pp. 56–62

DOI 10.18469/1810-3189.2021.24.3.56-62

Received 11 July 2021
Accepted 12 August 2021

The dynamics of synchronization of two-stage van der Pol generator

Valery V. Zaitsev¹, Alexander V. Karlov²

¹ Samara National Research University
34, Moskovskoye shosse,
Samara, 443086, Russia

² Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics
23, L. Tolstoy Street,
Samara, 443010, Russia

Abstract – Results of numerical simulation of self-oscillations synchronization process in two-cascade ring generator van der Pol by harmonic signal are presented. Studies were carried out within the framework of the DT- model of the dynamic system. The model was developed on the basis of the principle of compliance within the framework of the method of slowly changing amplitudes of characteristics of a discrete system with characteristics of an analog prototype. Shortened equations for complex oscillation amplitudes in generator stages are obtained. It was found that in an autonomous system there is an effect of bistability of amplitudes. In the synchronization mode with an external harmonic signal, solutions of shortened equations made it possible to calculate amplitude-frequency and phase-frequency characteristics of synchronous oscillations. It is shown that transitions between bistable states are observed in the synchronous oscillation holding band. Differences of frequency characteristics of synchronization of classical and two-stage oscillators van der Pol were analyzed.

Keywords – self-oscillations; van der Pol oscillator; ring generator; phase synchronization; discrete time; difference equations of motion; slow amplitudes; frequency characteristics.

Информация об авторах

Зайцев Валерий Васильевич, 1952 г. р. (с. Борское Куйбышевской области), кандидат физико-математических наук, профессор кафедры оптики и спектроскопии Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, г. Самара, Россия. Окончил Куйбышевский государственный университет (1975 г.) и аспирантуру при Горьковском государственном университете (1980 г., кафедра А.Н. Малахова). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в ГГУ (1980 г.). Автор более 300 научных работ.

Область научных интересов: нелинейные колебания, статистическая радиофизика, компьютерное моделирование в радиофизике.

E-mail: zaitsev@samsu.ru

Карлов Александр Владимирович, 1987 г. р. (с. Монастырище-2 Приморского края), кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теоретических основ радиотехники и связи Поволжского государственного университета телекоммуникация и информатики. Окончил Самарский государственный университет (2009 г.), а также аспирантуру при кафедре радиофизики и компьютерного моделирования радиосистем. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в СамГУ (2012 г.).

Область научных интересов: компьютерное моделирование в радиофизике, цифровая обработка сигналов, антенные системы.

E-mail: a.v.karlov@gmail.com

Information about the Authors

Valery V. Zaitsev, b. 1952 (v. Borskoe, Kuibyshev region), Candidate of Physical and Mathematical Sciences, professor of the Department of Optics and Spectroscopy, Samara National Research University, Samara, Russia. Graduated from Kuibyshev State University (1975) and postgraduate studies at Gorky State University (1980, department of A.N. Malakhov). He defended his thesis for the degree of Candidate of Physical and Mathematical Sciences at Gorky State University (1980). Author of over 300 scientific papers.

Research interests: nonlinear oscillations, statistical radiophysics, computer modeling in radiophysics.

E-mail: zaitsev@samsu.ru

Alexander V. Karlov, b. 1987 (Monastyryshche-2 village of Primorsky Krai), Candidate of Physical and Mathematical Sciences, associate professor of the Department of Theoretical Foundations of Radio Engineering and Communication, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia. He graduated from Samara State University in 2009 and post-graduated from Samara State University in 2012 (Department of Radiophysics and Computer Modeling of Radio Systems). He received the degree of Candidate of Physical and Mathematical Sciences in Samara State University in 2012.

Research interests: computer modeling in radio physics, digital signal processing, antenna systems.

E-mail: a.v.karlov@gmail.com