

Хаотична розширювальна послідовність лінійної частотної модуляції

Осипенко К. С., к.т.н., ORCID [0000-0002-6674-8332](https://orcid.org/0000-0002-6674-8332)
e-mail ekateryna.osypenko@gmail.com

Факультет електроніки, кафедра промислової електроніки
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» kpi.ua
Київ, Україна

Жуйков В. Я., д.т.н. проф., ORCID [0000-0002-3338-2426](https://orcid.org/0000-0002-3338-2426)
e-mail valery.zhuikov@gmail.com

Факультет електроніки
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» kpi.ua
Київ, Україна

Реферат—У наведеній статті запропоновано використання хаотичних сигналів як розширювальних послідовностей при лінійно-частотній модуляції. Наведено приклад схеми генератора хаотичного сигналу, побудованого на основі лінійних та перемикаючих елементів, а також рівняння, що описують роботу схеми. Показано результати розрахунку та моделювання процесів із конкретними заданими параметрами схеми. Наведено біфуркаційну діаграму та функції відображення для процесів з двома та трьома точками тяжіння. Показано, що при формуванні діапазону зміни частоти необхідно враховувати наявність «мертвої зони». Наведено формулу для розрахунку та графік зміни коефіцієнта кореляції. Для процесу з двома точками тяжіння наведено приклад цілочисельних послідовностей, які пропонується використовувати для ідентифікації виду хаотичного процесу.

Бібл. 7, рис. 4, табл. 1.

Ключові слова — лінійно-частотна модуляція; розширювальна послідовність; хаотичні процеси.

I. ВСТУП

Застосування шумоподібних сигналів (ШПС) має змістовне теоретичне підґрунтя та розповсюджену практичну реалізацію [1]. Однак, і сьогодні перед спеціалістами стоїть завдання забезпечення зміни частоти у системах з ШПС за таким лінійним законом, при якому функція переходу з попередньої частоти на наступну була б близькою або подібною до хаотичного процесу з рівномірною густиною розподілу. Зазвичай використовують псевдовипадкову послідовність [2], для побудови якої, зокрема, використовують багатокomпонентний сигнал з використанням коефіцієнтів розтягнення і стиснення, що дозволяє отримати сигнал близький до хаотичного [3]. Існує можливість застосувати для модуляції хаотичні функції, які отримуються як результат розв'язку детермінованих диференціальних рівнянь, реалізація вирішення яких схемотехнічними засобами наведена, наприклад, у роботах [4, 5]. Для збереження повного діапазону зміни частоти використовується звичайне подання лінійної частотної модуляції (ЛЧМ) сигналу, при чому залежність переходу від однієї частоти до іншої має випадковий характер. Метою роботи

є побудова розширювальних послідовностей лінійно-частотної модуляції на основі хаотичних функцій.

II. ГЕНЕРАТОР ХАОТИЧНОГО СИГНАЛУ

Хаотичний сигнал отримується у різноманітних схемах [6, 7], які побудовані на основі лінійних та перемикаючих елементів. Приклад однієї з таких схем наведений на рис. 1.

Рівняння, що описують роботу схеми, наведеної на рис. 1, мають наведений нижче вигляд:

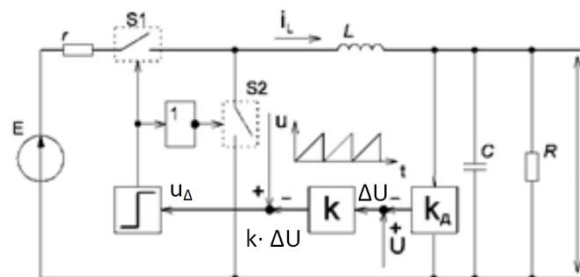


Рис. 1 Приклад схеми для отримання хаотичного сигналу

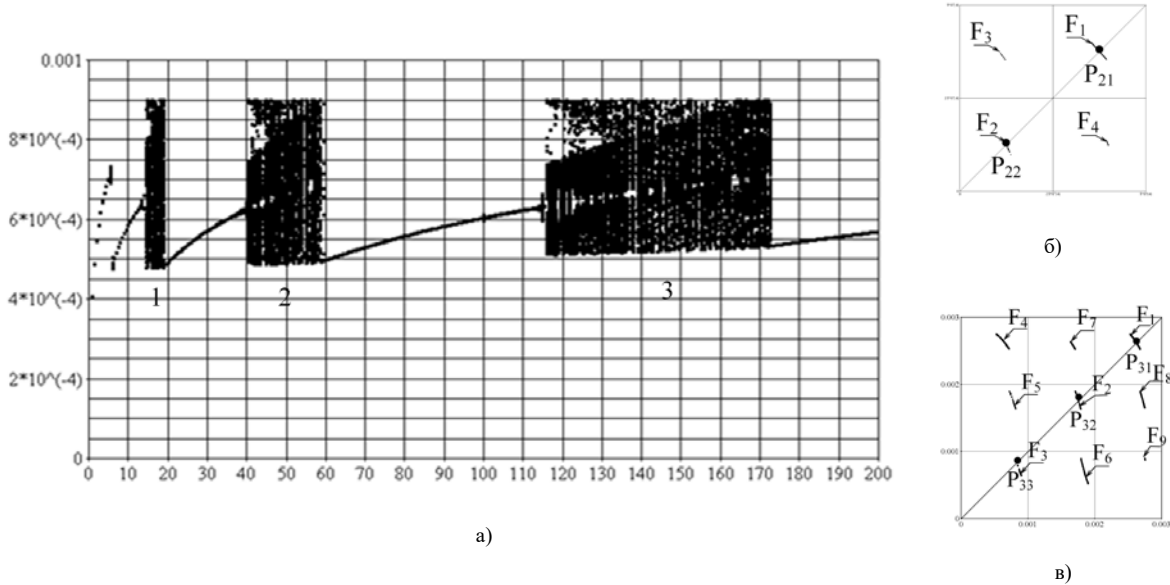


Рис. 2 Біфуркаційна діаграма залежності моменту перемикання τ від величини коефіцієнта підсилення k ланки зворотного зв'язку

$$\left\{ \begin{array}{l} \left| \frac{di}{dt} \right| = \left| \frac{\gamma r}{L} \quad -\frac{1}{L} \right| \left| i \right| + \left| \frac{\gamma E}{L} \right| \\ \left| \frac{du}{dt} \right| = \left| \frac{1}{C} \quad -\frac{1}{RC} \right| \left| u \right| \\ u_{\Delta}(t) = [U_{\Delta}(t - nT)]/T, n \in N \\ \Delta u(t) = U_3 - k_{\Delta} \cdot u(t) \\ u_{\Delta}(t) = k \cdot \Delta u(t) - u_{\Delta}(t) \\ \gamma(u_{\Delta}) = \begin{cases} 0, & u_{\Delta} < 0 \\ 1, & u_{\Delta} \geq 0 \end{cases} \end{array} \right. \quad (1)$$

де E – напруга джерела; R, r – опір навантаження та внутрішній опір джерела, відповідно; L, C – лінійні індуктивність та ємність; k – коефіцієнт підсилення ланки зворотного зв'язку; k_{Δ} – коефіцієнт ділення вихідної напруги; $u, u_{\Delta}, u_{\Delta}$ – напруга на ємності, опорна напруга та напруга генератора лінійно-змінної напруги з періодом T і амплітудою U_{Δ} .

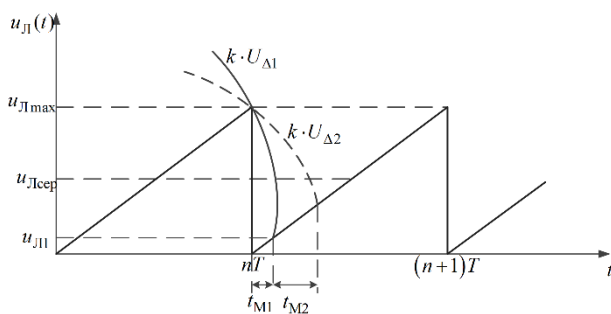


Рис. 3 Два приклади перетину функції $k \cdot \Delta u(t)$ з лінійно-змінною функцією $u_{\Delta}(t)$

Розрахунок та моделювання процесів проводиться на персональному комп'ютері з мікропроцесором Intel® Core™2 Duo 2 ГГц, і оперативною пам'яттю об'ємом 2 Гб засобами програмного забезпечення, написаного мовою C++. Розрахунок диференціальних рівнянь проводиться чисельним методом Рунге-Кутта четвертого порядку точності, з фіксованим кроком $\Delta t = 10^{-7}$ с. Середня тривалість моделювання процесу становить 600 секунд.

Для параметрів схеми: $R=100 \text{ Ом}; r=0,1 \text{ Ом}, L=0,1 \text{ Гн}, C=10^{-6} \text{ Ф}, E=1000 \text{ В}, U_{оп}=10 \text{ В}, U_M=10 \text{ В}, T=0,001 \text{ с}, k_{\Delta}=0,01, k=18$, корені p_1, p_2 характеристичного багаточлена матриці A є дійсними. При $\gamma=0 - p_1 = -8873,0, p_2 = -1127,0$, а при $\gamma=1 - p_1 = -8872,8, p_2 = -1128,2$. При заданих параметрах системи хаотичний процес знаходиться у першій області (1, рис. 2, а).

На рис. 3 наведено два приклади перетину функції $k \cdot \Delta u(t)$ з лінійно-змінною функцією $u_{\Delta}(t)$. Значення функції $u_{\Delta}(\tau)$, де $\tau_{\min} < \tau < T$ визначає значення частоти $f = k \cdot u_{\Delta}(\tau)$, де k – коефіцієнт пропорційності, (Гц/В).

Таким чином, несуча частота змінюється за лінійним законом, що визначається напругою розгортки $u_{\Delta}(t)$. Необхідно відмітити, що в залежності від похідної сигналу $k \cdot u_{\Delta}(t)$ змінюється і ширина «мертвої зони» t_M , в якій лінійно-змінювана напруга не бере участі у формуванні значень несучої частоти. На рис. 3 наведені «мертві зони» $t_{M1} < t_{M2}$ яким відповідають

дають співвідношення $\left[\frac{dk \cdot U_{\Delta 1}}{dt} > \frac{dk \cdot U_{\Delta 2}}{dt} \right]_{t=nT}$.



Наявність «мертвої зони» необхідно враховувати при формуванні діапазону зміни частоти.

Для збереження повного діапазону зміни можна зсувати початок кожної лінійно-змінної функції напруги $u_{\text{Л}}(t)$ на величину τ_{min} . У подальшому використовується звичайне подання лінійної частотної модуляції (ЛЧМ) сигналу $U_{\text{ЛЧМ}}(t)$ у вигляді

$$U_{\text{ЛЧМ}}(t) = U_m \cos(2\pi f_0 + 0,5ht^2 + \varphi_0),$$

де $h = 2\pi[f(T) - f(\tau_{\text{min}})] / (T - \tau_{\text{min}})$; U_m, φ_0 – амплітуда та початкова фаза $U_{\text{ЛЧМ}}(t)$; $f_0 = 0,5(f(\tau_{\text{min}}) + f(T))$. Залежність переходу від однієї частоти до іншої має випадковий характер і залежить від величини k .

Значенню коефіцієнта k , що знаходиться приблизно в діапазоні від 15 до 19, відповідає перша зона хаотичних коливань (1, рис. 2, а), яка характеризується однозначним відображенням Пуанкаре $\tau_{n+1} = F(\tau_n)$. При збільшенні коефіцієнта k система переходить в режим регулярних коливань, і починаючи зі значень $k=40$ до $k=59$ (2, рис. 2, а) функція відображення має вигляд, показаний на рис. 2, б. Для збереження однозначності відображення Пуанкаре функція $\tau_{n+1} = F(\tau_n)$ розбивається на чотири: F_1, F_2, F_3, F_4 . При чому функції F_1 та F_2 характеризуються точками тяжіння P_{21}, P_{22} , а функції F_3 та F_4 є функціями переходу від F_1 на F_2 і навпаки. При подальшому збільшенні коефіцієнта k система проходить через режим регулярних коливань і далі, при $k=117 - 173$ (3, рис. 2, а), потрапляє у режим хаотичних коливань, що характеризується трьома точками тяжіння P_{31}, P_{32}, P_{33} (рис. 2, в), що відповідають відображенням F_{31}, F_{32}, F_{33} . Функції $F_{34} - F_{39}$ є функціями переходу. Хаотичний процес і, відповідно, значення генерованої послідовності частот $f = k \cdot u_{\text{Л}}(\tau)$ (розширювальні послідовності) залежать від значень восьми параметрів системи диференційних рівнянь (1): $L, C, R, r, U_{\text{Л}}, U_3, k_{\text{Д}}, k$. Вважаючи, що кожен з параметрів може приймати 10 значень, число варіантів розширювальної послідовності більше ніж 2^{100} . При збільшенні k число точок тяжіння і відповідних відображень може як збільшуватись, так і зменшуватись.

ТАБЛИЦЯ 1 Приклад цілочисельної послідовності для процесу з двома точками тяжіння

F_1	...	7	5	23	9	11	7	19	1	5	17	13	3	7	3	7	21	...
F_2	...	0	2	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	...

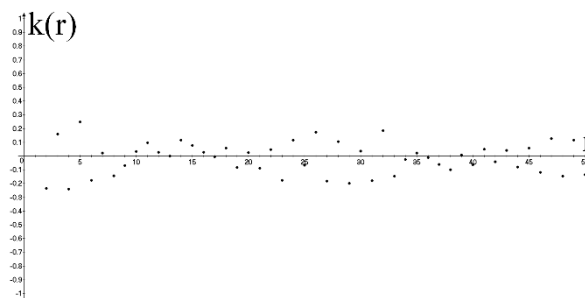


Рис. 4 Вигляд функції кореляції для відображення $t_m = f(t_{m+1})$

Не дивлячись на лінійну залежність частоти $f = k \cdot u_{\text{Л}}(\tau)$ і детермінований вигляд диференційних рівнянь, зміна частоти носить хаотичний характер, що ілюструється розрахованим коефіцієнтом кореляції для процесу, що має дві точки тяжіння.

Розрахунок коефіцієнта кореляції $k(r)$ для відображення $t_m = f(t_{m+1})$, що зображене на рис. 2, б, проводиться за формулою:

$$k(r) = \frac{1}{N_M - N_k} \sum_{m=0}^{N_M - N_k} \hat{t}_{m+r} \cdot \hat{t}_m,$$

де $\hat{t}_m = t_m - \bar{t}$; $\bar{t} = \frac{1}{N_M} \sum_{i=1}^{N_M} t_m$; N_M – загальне число

точок процесу, що розраховується (число інтервалів тривалістю T); N_k – число точок, в яких розраховується коефіцієнт кореляції. На рис. 4 наведено залежність функції кореляції $k(r)$, за результатами аналізу якої можна зробити висновок, що значення функції знаходяться близько нуля, а деяка її періодичність і відмінність від нуля, імовірно, пояснюється існуванням ділянок областей перехідного процесу, що повторюються.

Генеровані хаотичні послідовності $u_{\text{Л}}(\tau)$ мають таку властивість – послідовність цілих періодів функції $u_{\text{Л}}(t)$, що вкладаються між τ_n та τ_{n+1} , де τ_n відноситься до попередньої точки тяжіння, а τ_{n+1} – до наступної точки тяжіння, є хаотичною та унікальною. Приклад цілочисельної послідовності для процесу з двома точками тяжіння наведено у таблиці 1.

Використовуючи цю властивість можна ідентифікувати вид хаотичного процесу за цілочисельною послідовністю обмеженої довжини.

ВИСНОВКИ

Для побудови хаотичної розширювальної послідовності лінійної частотної модуляції доцільно використовувати детерміновані рівняння з перемикаючими функціями, а для ідентифікації такої послідовності пропонується використовувати цілочисельні послідовності кількості періодів, які вкладаються між точками генерованих частот.



ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] B. Sklar, *Cifrovaya svyaz* [Digital communications], Moscow: Williams, 2003, p. 1104. ISBN: 5-8459-0497-8
- [2] L.E. Varakin, *Sistemy svyazi s shumopodobnymi signalami* [Communication systems with noise-like signals], Moscow: Radio and communication, 1985, p. 384.
- [3] Y.G. Danyk, P.V. Pozdnyakov, «Mnogokomponentnyye ortogonal'nyye signal'nyye konstruksii dlya zashchishchennoy peredachi informatsii v radioliniyakh svyazi [Multicomponent orthogonal waveform designs for the secure communication in wireles channels],» *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, No. 1(10), pp. 84-91, 2013.
URL http://www.hups.mil.gov.ua/periodic-app/article/397/nitps_2013_1_19.pdf
- [4] E.N. Lorenz, *The Essence of Chaos (The Jessie and John Danz Lecture Series)*, Washington: University of Washington Press, 1995, p. 240. ISBN13: 9780295975146
- [5] A. S. Mushenko, J. N. Dzuba, A. D. Zolkin, «Recovering of useful signal in chaotic carrier data transmission system with state observer.» 2018 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT), 14-16 March 2018.
DOI: [10.1109/MWENT.2018.8337259](https://doi.org/10.1109/MWENT.2018.8337259)
- [6] V.Ya. Zhuikov, M.E. Kolichenko, «Klaster khaoticheskikh kolebaniy [Cluster of chaotic oscilations],» *Technical Electrodynamics*, № 4, pp. 29-33, 2013.
URL: http://www.techned.org.ua/2013_4/st4.pdf
- [7] A. O. Semenov, A. Yu. Savvitskiy, O. V. Bisikalo, P. I. Kulakov, «Mathematical modeling of the two-stage chaotic colpitis oscillator.» 2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), 20-24 Feb. 2018.
DOI: [10.1109/TCSET.2018.8336327](https://doi.org/10.1109/TCSET.2018.8336327)

Надійшла до редакції 20 червня 2018 р.

УДК 621.314

Хаотическая расширяющая последовательность линейной частотной модуляции

Осипенко Е. С., к.т.н., ORCID [0000-0002-6674-8332](https://orcid.org/0000-0002-6674-8332)

e-mail ekateryna.osypenko@gmail.com

Факультет электроники, кафедра промышленной электроники
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» kpi.ua
Киев, Украина

Жуйков В. Я., д.т.н. проф., ORCID [0000-0002-3338-2426](https://orcid.org/0000-0002-3338-2426)

e-mail valery.zhuikov@gmail.com

Факультет электроники, кафедра промышленной электроники
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» kpi.ua
Киев, Украина

Реферат—В приведенной статье предложено использование хаотических сигналов в качестве расширяющих последовательностей при линейно-частотной модуляции. Приведен пример схемы генератора хаотических сигналов, построенного на основе линейных и переключающих элементов, а также уравнения, описывающие работу схемы. Показаны результаты расчета и моделирования процессов с конкретными заданными параметрами схемы. Приведены бифуркационная диаграмма и функции отображения для процессов с двумя и тремя точками притяжения. Показано, что при формировании диапазона изменения частоты необходимо учитывать наличие «мертвой зоны». Приведены формула для расчета и график изменения коэффициента корреляции. Для процесса с двумя точками притяжения приведен пример целочисленных последовательностей, которые предлагается использовать для идентификации вида хаотического процесса.

Библ. 7, рис. 4, табл. 1.

Ключевые слова — линейно-частотная модуляция; расширяющая последовательность; хаотические процессы.



UDC 621.314

Chaotic Spreading Sequence for Linear Frequency Modulation

K. S. Osypenko, PhD, ORCID [0000-0002-6674-8332](https://orcid.org/0000-0002-6674-8332)

e-mail ekateryna.osypenko@gmail.com

Faculty of electronics, Department of Industrial Electronics

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" kpi.ua

Kyiv, Ukraine

V. Ya. Zhuikov, Dr.Sc.(Eng.) Prof., ORCID [0000-0002-3338-2426](https://orcid.org/0000-0002-3338-2426)

e-mail valery.zhuikov@gmail.com

Faculty of electronics, Department of Industrial Electronics

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" kpi.ua

Kyiv, Ukraine

Abstract—In the presented article the use of chaotic signals as spreading sequences for linear-frequency modulation is proposed. An example of a simplified block diagram for a chaotic signal generator constructed on the basis of linear and switching elements is given, as well as equations describing the operation of the circuit. The results of calculation and simulation of processes with specific specified parameters of the circuit are shown. The calculation of differential equations is carried out by a numerical method of Runge-Kutt of the fourth order of accuracy. It is shown that carrier frequency varies linearly, according to the scanning voltage. To maintain the full range of changes the beginning of each linear variable voltage function can be shifted for certain time interval. It is shown that when forming a range of frequency changes, it is necessary to take into account the presence of a "dead zone". The dependence of the transition from one frequency to another is random and depends on the values of correlation coefficient. A bifurcation diagram and display functions for processes with two and three attraction points are presented, The first zone of chaotic oscillations corresponds to the value of the coefficient, which is approximately in the range from 15 to 19. The second zone of chaotic oscillations correspond to the coefficient values from 40 to 59. The third zone of chaotic oscillations correspond to the coefficient values from 117 to 173. Between these zones regular oscillations are presented in the system. With an increase of correlation coefficient the number of attraction points and the corresponding display points can increase or decrease. The formulas for the calculation and the graph of the change in the correlation coefficient are given. It is shown that the correlation function is close to zero, some of its periodicity and the difference from zero is probably due to the existence of repeating areas of transient process. An example of an integer sequence for a process with two attraction points is given. For a process with two attraction points an example of integer sequences is given, which it is proposed to use to identify the type of chaotic process. The feature of generated chaotic sequences is shown – the sequence of integer function periods, which are enclosed between two attraction points is chaotic and unique. With using the deterministic equations with switching functions, a chaotic spreading sequence of linear frequency modulation is build, for identification of which it is proposed to use integer sequences of the number of periods that are enclosed between the points of generated frequencies.

Ref. 7, fig. 4, table 1.

Keywords — linear-frequency modulation; spreading sequence; chaotic processes.

