



ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ НЕЛІНІЙНОГО ЕЛЕМЕНТА ПЕРЕДАВАЧА ХАОТИЧНОЇ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ

ЕЛІЯШІВ О.М., РУСИН В.Б.,
ПОЛІТАНСЬКИЙ Л.Ф., КУШНІР М.Я.,
ПОЛІТАНСЬКИЙ Р.Л.

Описуються результати чисельного моделювання та експериментальних досліджень роботи нелінійних елементів схеми генератора Чуа для хаотичних систем зв'язку.

1. Вступ

В наш час інтенсивно досліджуються системи зв'язку, в основу роботи яких покладені властивості детермінованого хаосу [1-3]. Базовим елементом приймально-передавальних трактів таких систем є так званий „діод Чуа”, тобто радіокомпонент, який має суттєво нелінійні властивості [4-5]. Його наявність є необхідною умовою для реалізації у вказаних системах хаотичних коливань. Серед перших ґрунтовних досліджень поведінки цих елементів слід назвати роботи Л. Чуа, У. Сюсяня та Т. Мацумото [6-8]. В подальшому при аналізі передавання, приймання та обробки інформації в хаотичних системах зв'язку в більшості робіт поведінка нелінійних елементів описується в основному аналітично (див., наприклад [9-10]).

На нашу думку, чисельне моделювання і, особливо, саме аналіз експериментальних результатів роботи нелінійних елементів дають можливість повноцінно використовувати всі переваги детермінованого хаосу при практичній реалізації сучасних захищених систем зв'язку. Цьому важливому питанню і присвячена дана робота, в якій, зокрема, досліджено значення параметрів, при яких система характеризується хаотичною поведінкою, отримані результати чисельного моделювання та експериментальних досліджень роботи нелінійних елементів схеми.

2. Аналітична модель хаотичного генератора Чуа

Розглянемо більш детально роботу схеми Чуа, яка є однією із найпростіших систем з хаотичною поведінкою і представляє собою автоколивальну систему з 1,5 степенями свободи [11]. Схема складається з коливного контуру з втратами $\Gamma LC2$, інерційної ланки $RC1$ і активного нелінійного елемента, зображеного на схемі в вигляді нелінійної провідності (рис. 1).

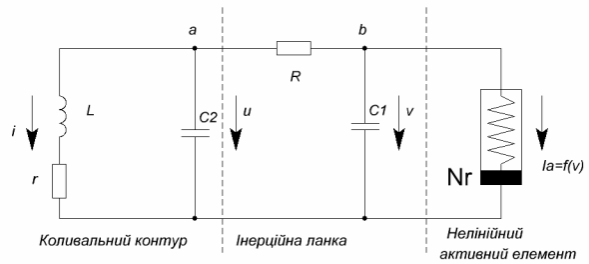


Рис. 1. Генератор Чуа

Генеруючий резонансний коливний контур $\Gamma LC2$ зв'язаний з активним нелінійним елементом через інерційну ланку $RC1$. Поведінка системи визначається впливом нелінійного елемента, що відіграє роль джерела живлення системи. Нагадаємо, що присутність нелінійності є необхідною, але недостатньою умовою для виникнення хаосу в системі.

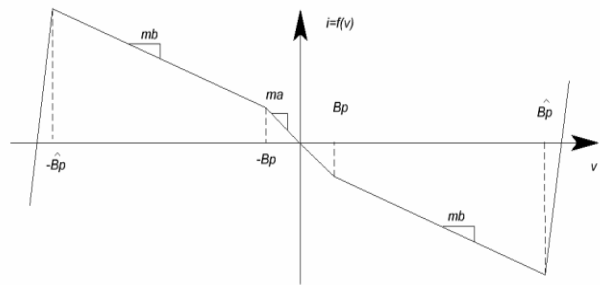


Рис. 2. Вольт-амперна характеристика нелінійного елемента

Обмежений характер хаотичних траєкторій обумовлений розсіюванням енергії в пасивних елементах R і r , що стримує її зростання в коливному контурі. Проте баланс енергії виявляється досить нестійким, неперервно змінюється в часі і ніколи не повторюється як періодичне явище.

Візьмемо як складові компоненти вектора стану системи струм i в контурі, напругу u на ємності $C2$ контура $\Gamma LC2$ і напругу v на нелінійному елементі. Згідно з першим і другим законів Кірхгофа запишемо систему трьох диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} L \frac{di}{dt} = -ri - u, \\ C2 \frac{du}{dt} = i + \frac{v - u}{R}, \\ C1 \frac{dv}{dt} = \frac{u - v}{R} - f(v), \end{cases} \quad (1)$$

де $f(v)$ – кусково-лінійна характеристика нелінійного елемента;

$$f(v) = m_b v + 0,5(m_b - m_a)[|v + B_p| - |v - B_p|], \quad (2)$$

тут m_a, m_b – розмірні крутизни лінійних ділянок; $+B_p, -B_p$ – точки перегину нелінійної характеристики (рис. 2).

Перше рівняння представляє суму падіння напруги при круговому обході резонансного коливного контура, а друге і третє дають відповідно суму струмів для вузлових точок а і b схеми, представленої на рис. 1.

Проведемо нормування змінних i , u , v в системі відносно напруги V_p :

$$x = v / V_p, y = u / V_p, z = Ri / V_p \quad (3)$$

і перейдемо до безрозмірного часу $t' = t / R_c$. В безрозмірних величинах система рівнянь (1), що описує схему Чуа, приймає такий вигляд:

$$\begin{cases} dx/dt = \alpha[y - x - f(x)]; \\ dy/dt = x - y + z; \\ dz/dt = -\beta y + (T/T_k)z, \end{cases} \quad (4)$$

де $\alpha = C_2 / C_1$, $\beta = T / \tau$, $\tau = L / R$, $T = RC$ (міра інерційності RC кола); $T_k = L / r$, де $T = RC$.

З врахуванням нормування напруги $v = x \cdot V_p$ можемо замість (4) записати безрозмірну характеристику активного елемента у вигляді:

$$f(x) = bx + 0,5(a - b)[|x + 1| - |x - 1|], \quad (5)$$

де коефіцієнти $a = Rm_a$, $b = Rm_b$ – також безрозмірні величини.

Щоб спростити аналіз схеми, знехтуємо доданком $(T / T_k)z$ в третьому рівнянні (4). Це значить, що ми нехтуємо втратами в LC_2 контурі, приймаючи, що $r=0$. Тоді при вибраних коефіцієнтах a , b характеристики (5) реалізація тих чи інших процесів у схемі Чуа визначається значеннями її двох основних параметрів. Роль першого параметра відіграє відношення ємностей $\alpha = C / C_1$, а другого – відношення постійних часу $\beta = T / \tau$. Постійна $T = RC$ є мірою інерційності RC кола, а постійна часу $\tau = L / R$ характеризує інерційність ланки, що складається з елементів L і R .

3. Комп'ютерне моделювання схеми

Моделювання схеми проводилось, вважаючи, що вольт-амперні характеристики (ВАХ) для конденсаторів, резисторів та індуктивності є лінійними, а ВАХ нелінійного елемента є кусково-лінійною. Головним завданням при дослідженні є коректне моделювання нелінійного елемента. В нашому випадку нелінійність реалізована в двох варіантах – на операційному підсилювачі в сукупності з діодами та на двох операційних підсилювачах.

3.1. Моделювання схеми Чуа з використанням як нелінійного елемента операційного підсилювача в сукупності з діодами

Характеристична часова константа, що використовувався при моделюванні становила, 50 мс.

Для моделювання схеми генератора Чуа використовувалися компоненти з такими номіналами: $C_1=100$

нФ, $C_2=10$ нФ, $L=22$ мГн, $R_1=2$ кОм, $R_2=R_3=3,3$ кОм, $R_4=R_5=4,62$ кОм, $R_7=R_8=300$ Ом, $R_6=1,25$ кОм, $DA=TL082$, $VD_1=VD_2=1N914$.

Результати комп'ютерного моделювання схеми генератора Чуа з використанням нелінійного елемента на операційному підсилювачі та діодах (рис. 3) в програмному середовищі Мікро-Сар наведені на рис. 4 та 5.

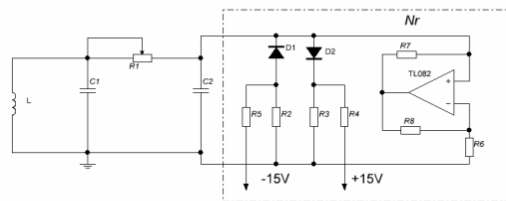


Рис. 3. Досліджувана схема генератора Чуа (класичний варіант)

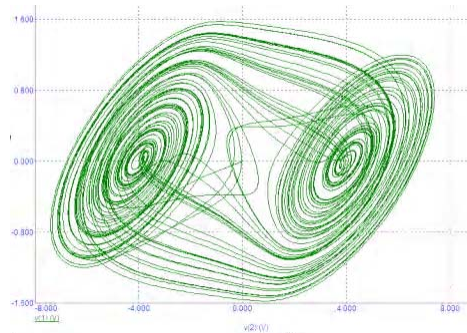


Рис. 4. Хаотичний двохспіральний аттрактор схеми генератора Чуа (осцилограма фазової траєкторії на площині V_{C1}, V_{C2})

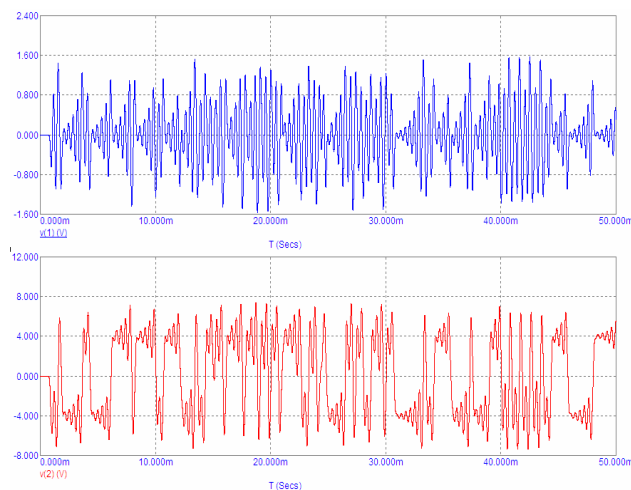


Рис. 5. Осцилограма часових залежностей сигналів V_{C1} , V_{C2} генератора Чуа

Гранична частота генерованих коливань залежить від типу діодів VD_1 , VD_2 , що формують кусково-лінійну характеристику нелінійного елемента.

3.2. Моделювання схеми Чуа з використанням нелінійного елемента на операційних підсилювачах

Для моделювання схеми генератора Чуа (рис.6) використовувалися компоненти з такими номіналами: $C1=10$ нФ, $C2=100$ нФ, $L=22$ мГн, $R1=2$ кОм, $R4=R3=220$ Ом, $R5=R6=22$ кОм, $R2=2,2$ кОм, $R7=3,3$ кОм, $DA1=DA2=TL082$.

Результати моделювання наведені на рис. 7 та 8.

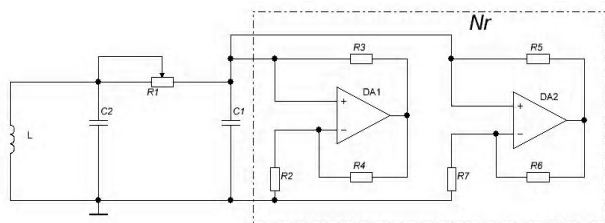


Рис. 6. Схема генератора Чуа (нелінійний елемент реалізований на операційних підсилювачах)

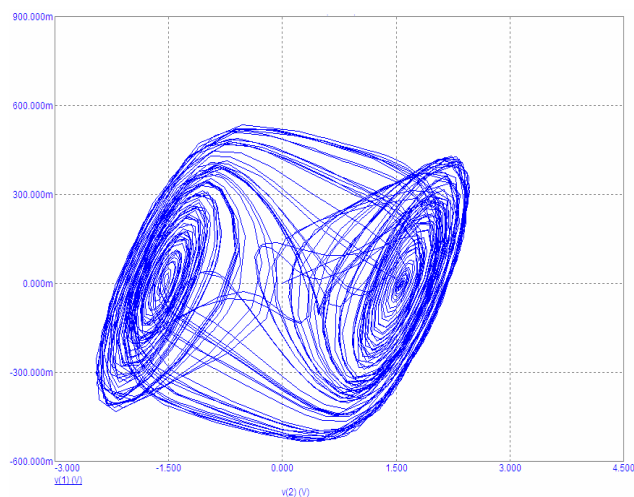


Рис. 7. Хаотичний двохспіральний атрактор схеми генератора Чуа з використанням операційних підсилювачів (осцилограма фазової траєкторії на площині V_{C1}, V_{C2})

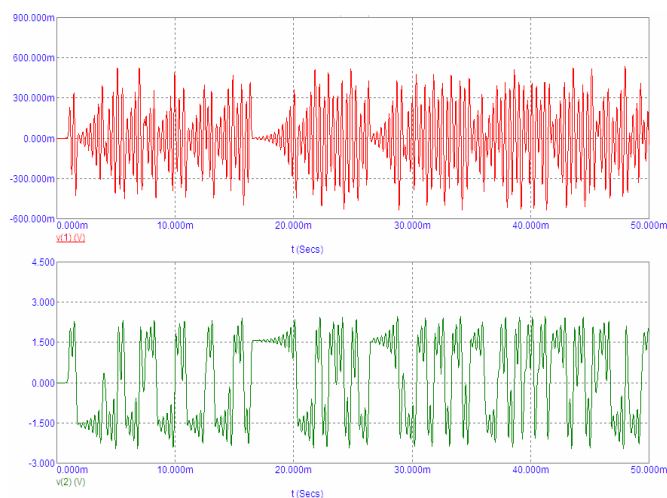


Рис. 8. Часова залежність сигналів V_{C1}, V_{C2} генератора Чуа

4. Експериментальні результати

ВАХ нелінійного елемента досліджувалася за схемою, наведеною на рис. 9. При цьому на нелінійний елемент подавався сигнал синусоїдальної форми (рис.10). Необхідно зазначити, що амплітуда вхідного сигналу не повинна перевищувати напругу живлення нелінійного елемента, оскільки в протилежному разі система є дисипативною.

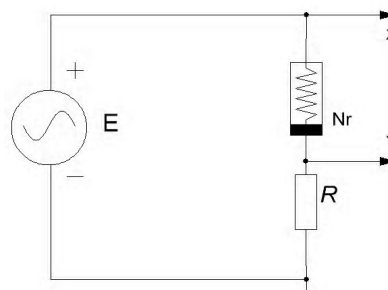
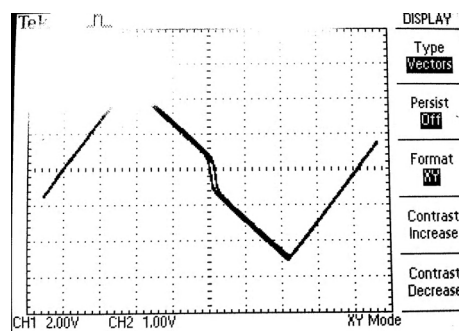
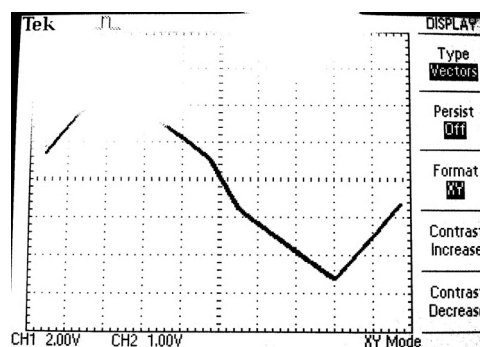


Рис. 9. Схема зняття кусково-лінійної характеристики нелінійного елемента

Кусково-лінійна характеристика була знята при таких параметрах схеми включення: $U_{вх}=8,5$ В, $R=400$ Ом, $f=2$ кГц.



а

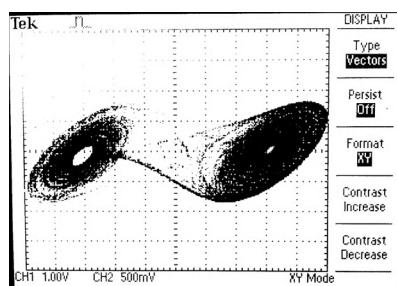


б

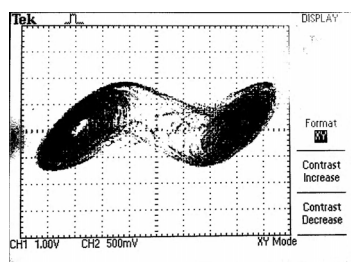
Рис. 10. Вольт-амперна характеристика нелінійних елементів генератора Чуа при різних схемах реалізації: а – класичний варіант реалізації генератора Чуа; б – реалізація генератора Чуа з використанням операційних підсилювачів

За допомогою експериментально реалізованих генераторів були отримані атрактори, наведені на рис. 11.

Нарис. 12 та 13 наведені відповідно перехідні хаотичні процеси та їх спектри сигналів.

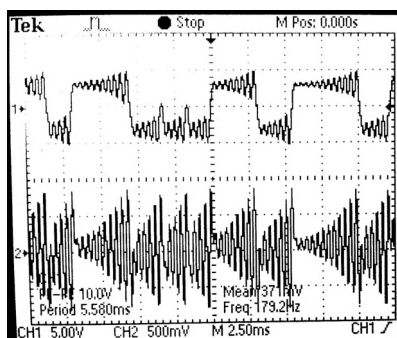


а

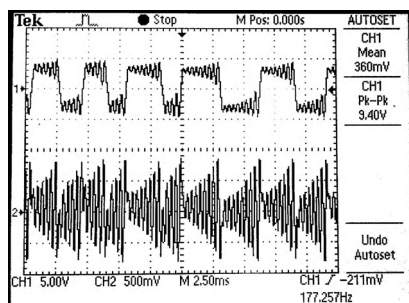


б

Рис. 11. Атрактори генератора Чуа при різних схемах реалізації: а – класичний варіант реалізації генератора Чуа; б – реалізація генератора Чуа з використанням операційних підсилювачів

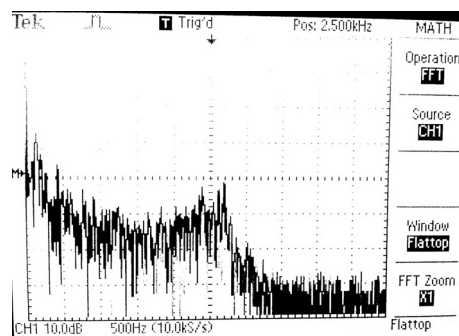


а

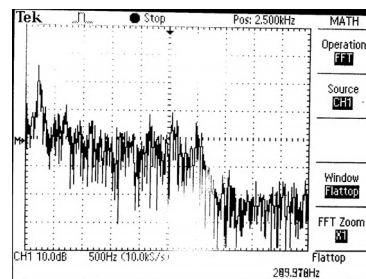
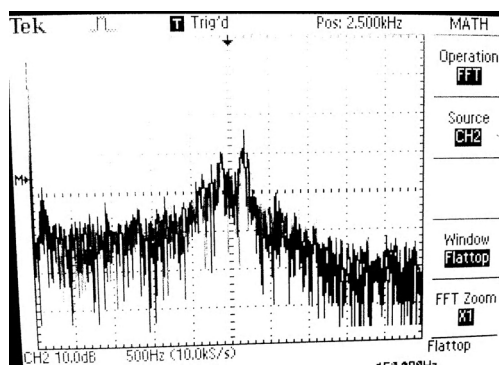


б

Рис. 12. Перехідні хаотичні процеси генератора Чуа: а – класичний варіант реалізації генератора Чуа (V_{C2} , V_{C1}); б – реалізація генератора Чуа з використанням операційних підсилювачів (V_{C2} , V_{C1})



а



б

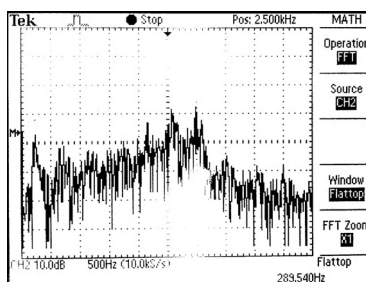


Рис. 13. Спектри сигналу (V_{C1} , V_{C2}): а – класичний варіант реалізації генератора Чуа; б – реалізація генератора Чуа з використанням операційних підсилювачів

Як видно з рис. 13, спектри хаотичних сигналів знаходяться в діапазоні 0-5 кГц, що вказує на можливість їх використання для маскування мовних сигналів.

5. Висновки

1) В роботі представлені результати чисельного моделювання та експериментальних досліджень роботи двох модифікацій схеми Чуа та її нелінійного елементу.

та. Повне якісне та частково кількісне збігання цих результатів вказує на правильний методологічний підхід при теоретичному та практичному аналізах складних явищ у фазовому просторі хаотичних осциляторів.

2) Експериментально підтверджена можливість певного контролю хаотичної поведінки у фазовому просторі осцилятора Чуа.

3) Оскільки розглянуті схеми є основними елементами передавально-приймальних блоків хаотичних систем зв'язку, то хаотичний контроль дасть можливість схемотехнічно реалізувати інтегровану систему вказаного типу. Результати таких досліджень будуть представлені в наступних роботах.

Література: 1. *Stavrinos S.G., Anagnostopoulos A.N., Miliou A.N., Valaristos A., Magafas L., Kosmatopoulos K. and Papaioannou S.* Digital Chaotic Synchronized Communication System // *Journal of Engineering Science and Technology. Review* 2 (1). 2009. P. 82-86. 2. *Wagemakers A., Buldu J.M. and Sanjun M.A.F.* Experimental demonstration of bidirectional chaotic communication by means of isochronal synchronization // *EPL*. 2008. № 81. P. 405. 3. *Стасев Ю.В., Васюта К.С., Женжеря С.В.* Інформаційні системи на основі динамічного хаосу // *Системи озброєння і військова техніка*. 2009. №1(17). С. 134-138. 4. *Galias Zbigniew.* Study of Poincare map associated with the Chua's circuit using interval arithmetic // *International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications*. Xi'an, PRC. October 7-11, 2002. P. 779-782. 5. *Ramirez-Jyila Gonzalo M., Gallas Jason A.C.* How similar is the performance of the cubic and the piecewise-linear circuits of Chua? // *Physics Letters A* 375. 2010. P. 143-148. 6. *Хаслер М.Ж.* Электрические схемы с хаотическим поведением // *ТИИЭР. Хаотические системы (тематический выпуск)*. 1987. Т. 75, №8. С. 40-54. 7. *Сюсань У.* Семейство схемы Чуа // *ТИИЭР. Хаотические системы (тематический выпуск)*. 1987. Т. 75, №8. С. 55-65. 8. *Мацумото Т.* Хаос в электронных схемах // *ТИИЭР. Хаотические системы (тематический выпуск)*. 1987. Т. 75, №8. С. 66-87. 9. *Maranhao D. M. and Prado P.C.* Evolution of chaos in the Matsumoto-Chua circuit: a symbolic dynamics approach // *Brazilian Journal of Physics*. Vol. 35. March 2005. № 1. P. 162-169. 10. *Control of chaos in nonlinear circuits and systems.* Edited by Bingo Wing-Kuen Ling, Herbert Ho-Ching Lu, Hak-Keung Lam. Singapore: World Scientific

Publishing Co. Pte. Ltd. Vol. 64. 2009. P. 281. 11. *Torres and L. B., Aguirre L. A.* PCCUA – A Laboratory setup for real-time control and synchronization of chaotic oscillations // *International Journal of Bifurcation and Chaos*. 2005. Vol. 15. № 8. P. 2349-2360.

Надійшла до редколегії 24.05.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Лукін В.В.

Еліяшів Олег Миронович, асистент кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки фізичного факультету Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича. Наукові інтереси: хаос та програмування мікроконтролерів. Захоплення і хобі: шахмати, оригамі. Адреса: Україна, 76006, Івано-Франківськ, вул. Миколайчука, 26, кв. 46, тел. 0633267760.

Русин Володимир Богданович, асистент кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки фізичного факультету Чернівецького національного університету ім. Юрія Федьковича. Наукові інтереси: управління детермінованим хаосом. Захоплення і хобі: футбол, теніс, персональний комп'ютер. Адреса: Україна, 58000, Чернівці, вул. Чапаєва, 43, кв. 89, тел. 0977496088.

Політанський Леонід Францович, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки фізичного факультету Чернівецького національного університету ім. Юрія Федьковича. Наукові інтереси: інформаційні системи зв'язку на основі детермінованого хаосу. Захоплення і хобі: футбол. Адреса: Україна, 58000, Чернівці, вул. Руська, 251, кв. 55, тел. (03722) 6-18-61.

Кушнір Микола Ярославович, канд. фіз.-мат. наук, доцент кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки фізичного факультету Чернівецького національного університету ім. Юрія Федьковича. Наукові інтереси: детермінований хаос. Захоплення і хобі: футбол, класична рок-музика. Адреса: Україна, 58000, Чернівці, пров. Курилський, 24Б, тел. 0506772202.

Політанський Руслан Леонідович, канд. фіз.-матем. наук, доцент кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки фізичного факультету Чернівецького національного університету ім. Юрія Федьковича. Наукові інтереси: генератори псевдовипадкових послідовностей. Захоплення і хобі: теніс. Адреса: Україна, 58000, Чернівці, вул. Руська, 251, кв. 55, тел. (03722) 6-18-61.