

УДК 621.373.5

А. О. СЕМЕНОВ

## **ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИЙ ГЕНЕРАТОР ДЕТЕРМІНОВАНОГО ХАОСУ НА ОСНОВІ БІПОЛЯРНОЇ ТРАНЗИСТОРНОЇ СТРУКТУРИ З ВІД'ЄМНИМ ОПОРОМ**

*Вінницький національний технічний університет,  
21021, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна  
E-mail: semenov.a.o@yntu.edu.ua*

**Анотація.** Запропоновано нову схему оптико-електронного генератора детермінованого хаосу на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним опором. Проведено комп'ютерне схемотехнічне дослідження параметрів і характеристик генерованих електричних коливань. Отримано фазові портрети генератора, часові діаграми, частотні та статистичні характеристики генерованих хаотичних коливань.

**Ключові слова:** генератор, хаос, транзисторна структура, від'ємний опір, фазовий портрет.

**Аннотация.** Предложена новая схема оптоэлектронного генератора детерминированного хаоса на основе биполярной транзисторной структуры с отрицательным сопротивлением. Проведены компьютерные схемотехнические исследования параметров и характеристик генерируемых электрических колебаний. Получены фазовые портреты генератора, временные диаграммы, частотные и статистические характеристики генерируемых хаотических колебаний.

**Ключевые слова:** генератор, хаос, транзисторная структура, отрицательное сопротивление, фазовый портрет.

**Abstract.** A new scheme of an optoelectronic oscillator of deterministic chaos based on the bipolar transistor structure with negative resistance is proposed. A computer circuitry research of the parameters and characteristics of generated electric oscillations was carried out. The phase portraits of the oscillator, time diagrams, frequency and statistical characteristics of the generated chaotic oscillations are obtained.

**Key words:** oscillator, chaos, transistor structure, negative resistance, phase portrait.

### **ВСТУП**

Розвиток приладів генерування та формування сигналів із хаотичною динамікою є актуальним сучасним науковим напрямком [1-8]. Автоколивальні системи детермінованого хаосу демонструють велику ефективність, оскільки вони чутливо реагують на малі збурення, а тому здатні генерувати і контролювати сигнали з малою кількістю енергії [2]. Одна й та ж автоколивальна система детермінованого хаосу при малих змінах початкових умов або параметрів системи здатна генерувати різні інформаційні сигнали [1]. На відміну від відомих методів модулювання та кодування аналогових сигналів, сигнали детермінованого хаосу мають більшу інформаційну ємність і завадостійкість, до того ж в багатьох випадках хаотичні сигнали є ортогональними [3, 4]. Один з основних прикладних застосувань досягнень теорії детермінованих хаотичних систем є область оптичних комунікацій [8]. Суттєвою перевагою хаотичних оптико-електронних систем є те, що немає обмеження спектрів смуг частот інформаційних сигналів, а тому кількість доступних каналів зв'язку може бути більшою, ніж радіочастотних каналів у класичних системах зв'язку [8]. Єдиною границею обмеження кодування хаотичних оптико-електронних сигналів є здатність одержувачів розрізняти різні хаотичні стани [8].

Електричні схеми оптико-електронних генераторів детермінованого хаосу повинні бути достатньо простими, щоб їх можна було синхронізувати [5-7]. Особливістю генерування та формування сигналів детермінованого хаосу аналоговими пристроями є використання їхніх нелінійних статичних або

динамічних характеристик. Простота схемних рішень генераторів детермінованого хаосу є необхідною умовою для зменшення нестабільностей в роботі електронних і оптичних приладів, які зумовлені концентрацією домішок, швидкістю рекомбінації носіїв, дефектів кристала та ін., що призводить до переходу автоколивальної системи від хаотичних коливань до стохастичних.

Метою роботи є дослідження часових, частотних та статистичних параметрів і характеристик сигналів малопотужного оптико-електронного генератора детермінованого хаосу на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним опором.

### РОЗРОБКА СХЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ДЕТЕРМІНОВАНОГО ХАОСУ

Широко відомі оптико-електронні генератори на основі транзисторних структур з від'ємним опором [9, 10]. Детально розроблені елементи теорії таких оптико-електронних генераторів, які працюють в осциляторному або релаксаційному режимах [9, 10]. У той же час, дослідженню хаотичних режимів роботи цих генераторів не приділено уваги. Простий спосіб отримання генератора хаотичних коливань полягає в додаванні до електричної схеми синусоїдального генератора кола з послідовно з'єднаних діода, резистора і котушки індуктивності [11, 12]. У роботі розглянута можливість отримання хаотичного режиму в оптико-електронному генераторі на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним опором, електрична схема якого наведена на рис. 1. Номінали радіокомпонентів обрано з таких міркувань: 1) забезпечити максимальну протяжність спадної ділянки статичних ВАХ; 2) забезпечити широку зміну еквівалентної ємності транзисторної структури [13].

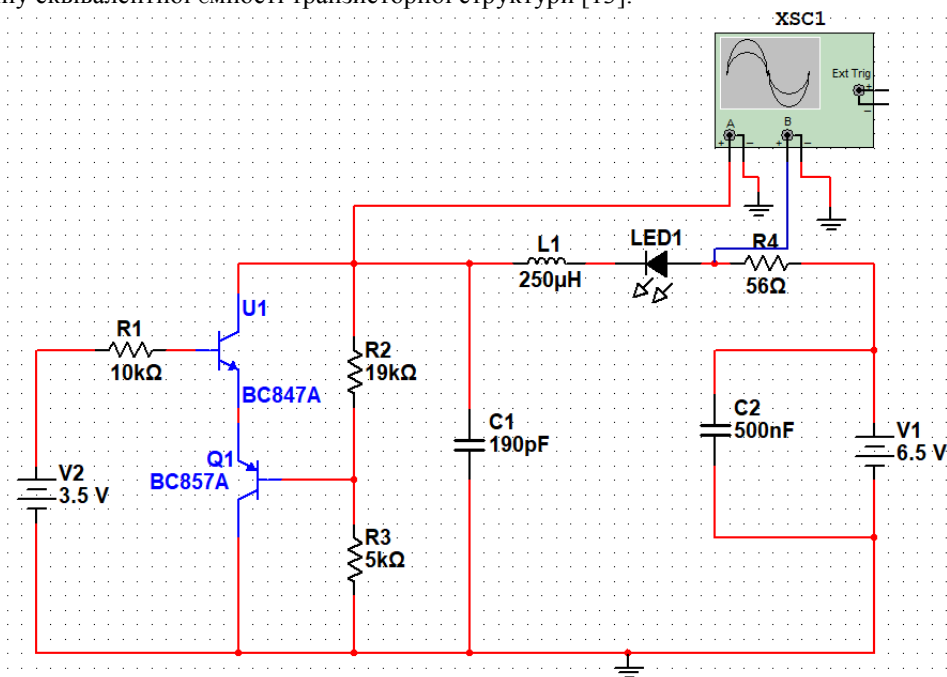


Рис. 1. Електрична схема оптико-електронного генератора детермінованого хаосу на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним опором із вимірювальним обладнанням у програмі Multisim 10.1

У роботі [13] наведено отримані автором результати комп'ютерного схемотехнічного моделювання в Multisim 10.1 хаотичного режиму базової схеми генератора електричних коливань на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним опором без додаткового електричного кола LED1-R4. Показано, що в такому випадку автоколивальна система має три динамічні змінні, дві з яких це напруги на еквівалентних ємностях транзисторної структури з від'ємним опором (відповідно на електродах база U1 – колектор Q1 та колектор U1 – колектор Q1), а третя – струм індуктивності L1. Динамічні процеси детермінованого хаосу визначаються реактивними властивостями біполярної транзисторної структури з від'ємним опором і за природою близькі до хаотичних процесів у генераторі за схемою ємнісної триточки [13]. Автором у [13] показано, що недоліком такого генератора є слабка навантажувальна здатність (значний вплив опору навантаження на динаміку хаотичних коливань). Для зміни динаміки хаотичних коливань та розширення робочого об'єму фазового простору в роботі [14] до індуктивної вітки базової схеми генератора на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним опором додано коло з послідовно включених діода та резистора. У [14] наведено отримані автором результати схемотехнічного моделювання в ORCAD 9.2 хаотичного режиму генератора з інерційною нелінійністю.

## РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ДЕТЕРМІНОВАНОГО ХАОСУ

Генерована хаотична напруга знімається з колектора транзистора U1 (основний вихід генератора). У цьому випадку хаотична динаміка контролюється зміною напруги джерел живлення V1 і V2. При підключенні опору навантаження потрібно врахувати внесений нею активний та реактивний опір до коливального контуру генератора. Застосування світлодіоду дозволяє здійснити гальванічну розв'язку виходу генератора детермінованого хаосу з навантаженням. У цьому випадку генератор працює в режимі холостого ходу по основному виходу, що дозволяє широко його використовувати у схемах пристроїв вимірювального контролю та автоматики.

На рис. 2 наведені фазові портрети хаотичних коливань у різних площинах динамічних змінних автоколивальної системи генератора.

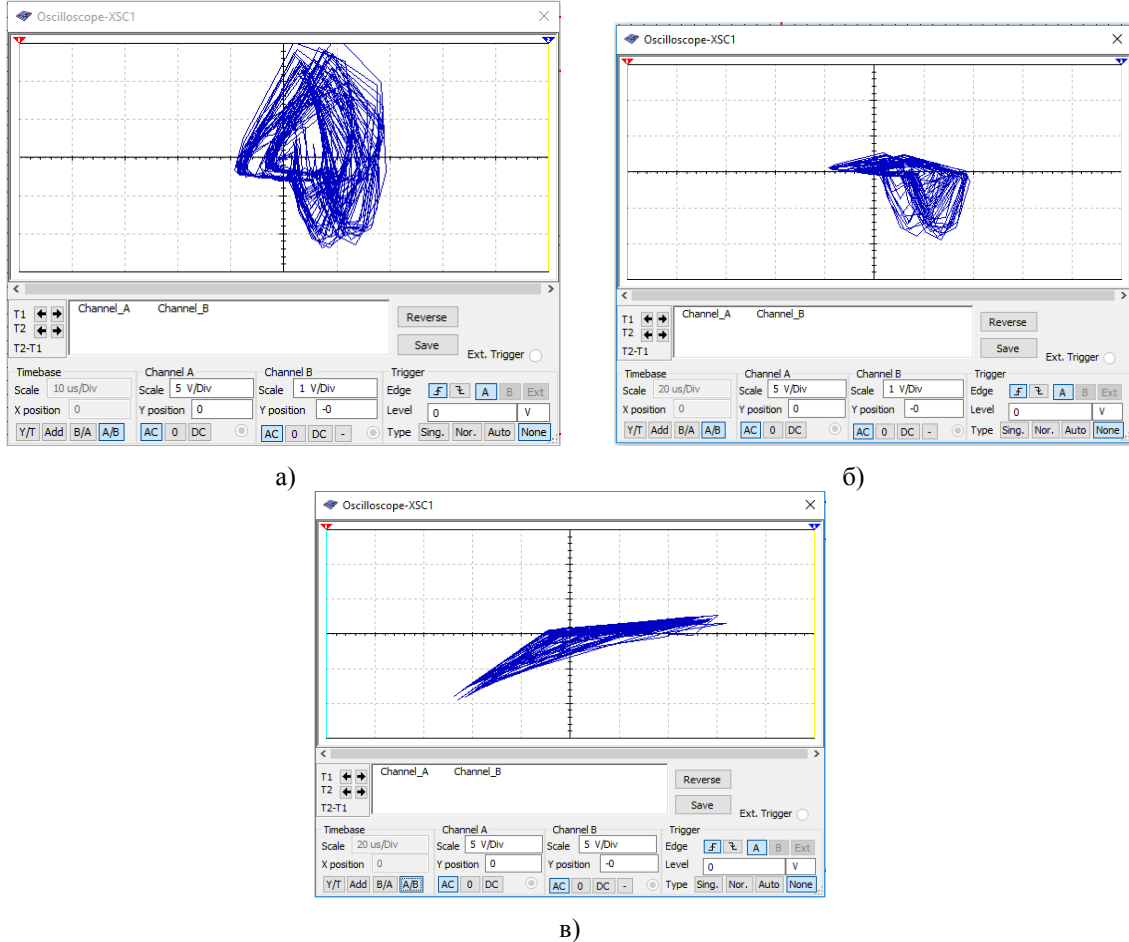


Рис. 2. Фазові портрети генератора в площині генерованих напруг:

а) на колекторі U1 та на аноді LED1, б) на базі U1 та аноді LED1, в) на базі U1 та на колекторі U1

На рис. 3 і рис. 4 наведені осцилограми та амплітудно-частотні спектри хаотичних коливань відповідно, які отримані в Multisim 10.1. Як видно з осцилограм на рис. 3,а і рис.3,б, наочно спостерігається перехід від періодичних коливань до хаотичних за сценарієм Фейгенбаума шляхом подвоєння періоду генерованих коливань. Це пояснюється переходом робочої точки з однієї фазової траєкторії на іншу (рис. 2,а і рис. 2,б відповідно). На рис. 2,в посередині осцилограми зафіксований момент переходу робочої точки між фазовими траєкторіями. Амплітудно-частотний спектр генерованих коливань має складний характер. Графіки обвідних амплітудно-частотного спектру генерованих хаотичних коливань наведені на рис. 3. Як видно з рис. 3 у запропонованому генераторі більш інформативними є перша й друга динамічні змінні (напруга на базі транзистора U1 та напруга на колекторі транзистора U1).

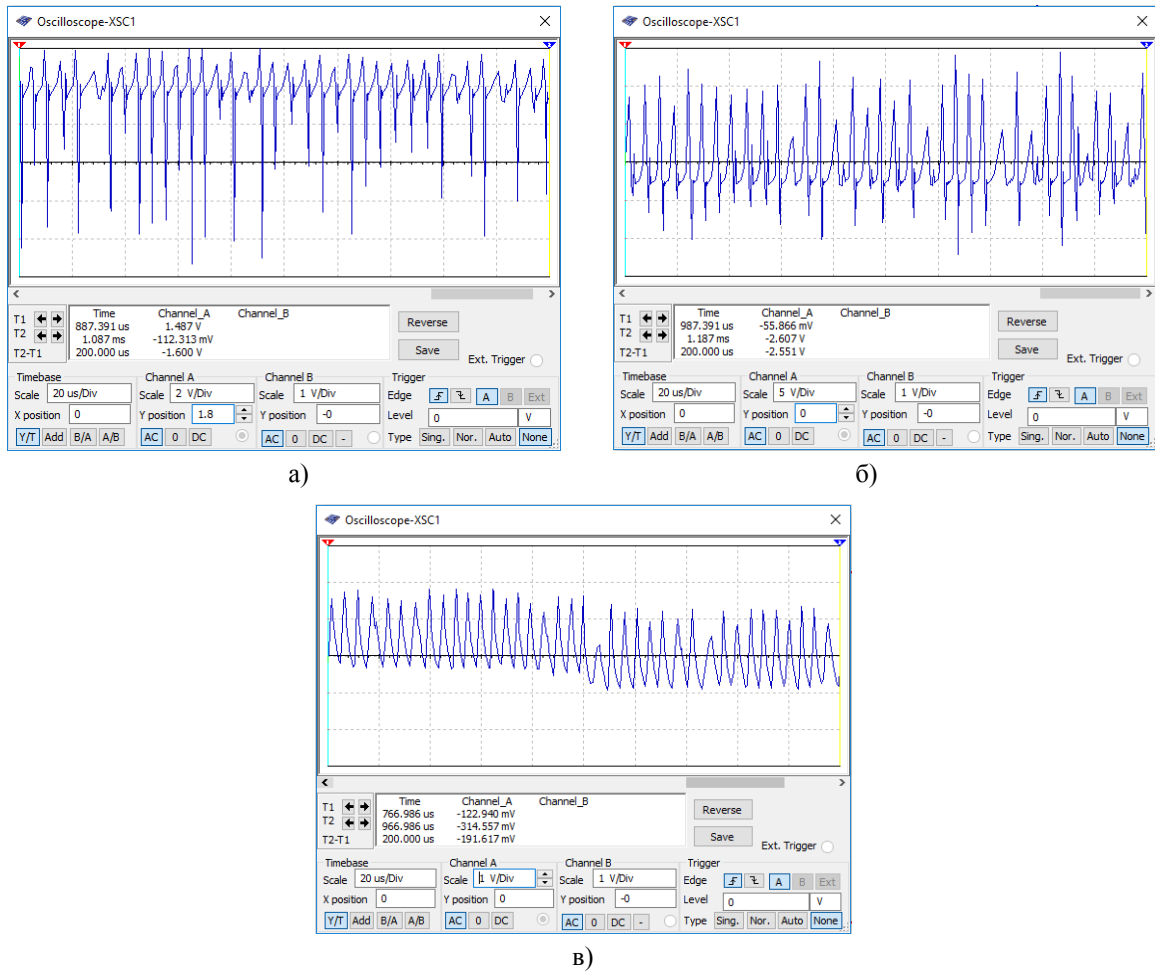
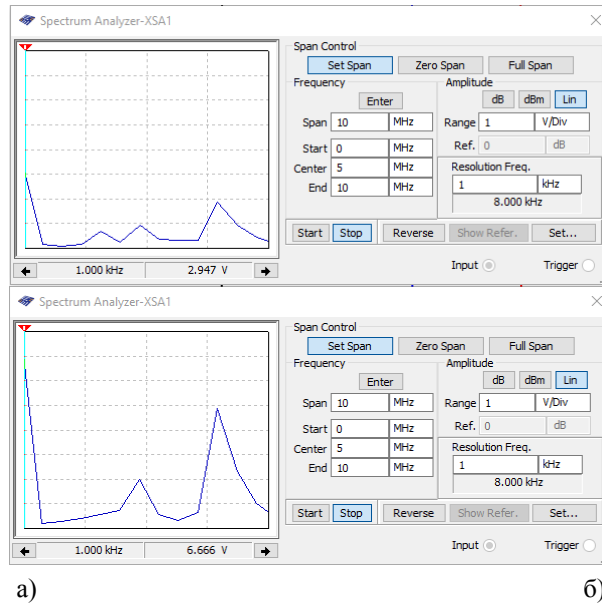
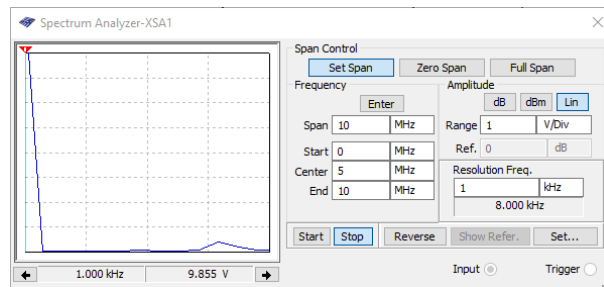


Рис. 3. Часові діаграми (осцилограми) генерованих хаотичних напруг генератору: а) на базі транзистора U1, б) на колекторі транзистора U1, в) на аноді світлодіоду LED1



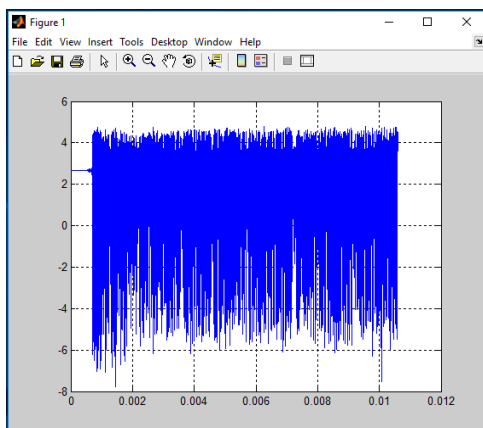


в)

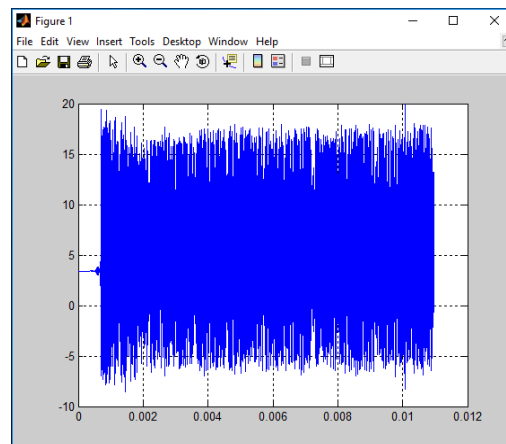
Рис. 4. Амплітудо-частотні спектри генерованих хаотичних напруг генератора:  
а) на базі транзистора U1, б) на колекторі транзистора U1, в) на аноді світлодіоду LED1

### СТАТИСТИЧНІ ПАРАМЕТРИ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОГО ГЕНЕРАТОРУ ДЕТЕРМІНОВАНОГО ХАОСУ

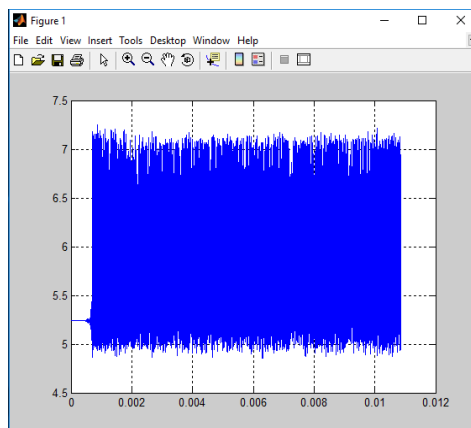
Для аналізу статистичних характеристик генерованих хаотичних імпульсів подальші обчислення здійснені в MATLAB 7.0.1. З цією метою табличні значення осцилограм хаотичних коливань напруги збережені в Oscilloscope пакету програм Multisim 10.1 та імпортовані до MATLAB 7.0.1. На рис. 5 наведено часові діаграми ансамблів хаотичних електричних коливань динамічних змінних автоколивальної системи оптико-електронного генератора детермінованого хаосу. На рис. 5 по вісі абсцис – час спостереження у секундах, а по вісі ординат – напруга у вольтах.



а)



б)



в)

Рис. 5. Часові діаграми ансамблів хаотичних електричних коливань динамічних змінних (напруги) автоколивальної системи оптико-електронного генератора детермінованого хаосу:  
а) на базі транзистора U1, б) на колекторі транзистора U1, в) на аноді світлодіоду LED1

Як видно з осцилограм на рис. 5 час становлення стаціонарних хаотичних електричних коливань знаходиться у межах 699,68...700,942 мкс. Порівнюючи досліджуваний оптико-електронний генератор із його аналогом у роботі [13] потрібно відзначити вищу швидкість, яка позначається не лише в часі становлення коливань, але меншим часом тривання перехідних процесів при електричному перелаштуванні основної частоти генерації імпульсів.

На рис. 6 наведені гістограми функцій розподілу значень генерованих хаотичних імпульсів по їх рівню при короткочасному спостереженні (1,08 мс). На рис. 6 по вісі абсцис – рівень імпульсу напруги, по вісі ординат – кількість таких імпульсів.

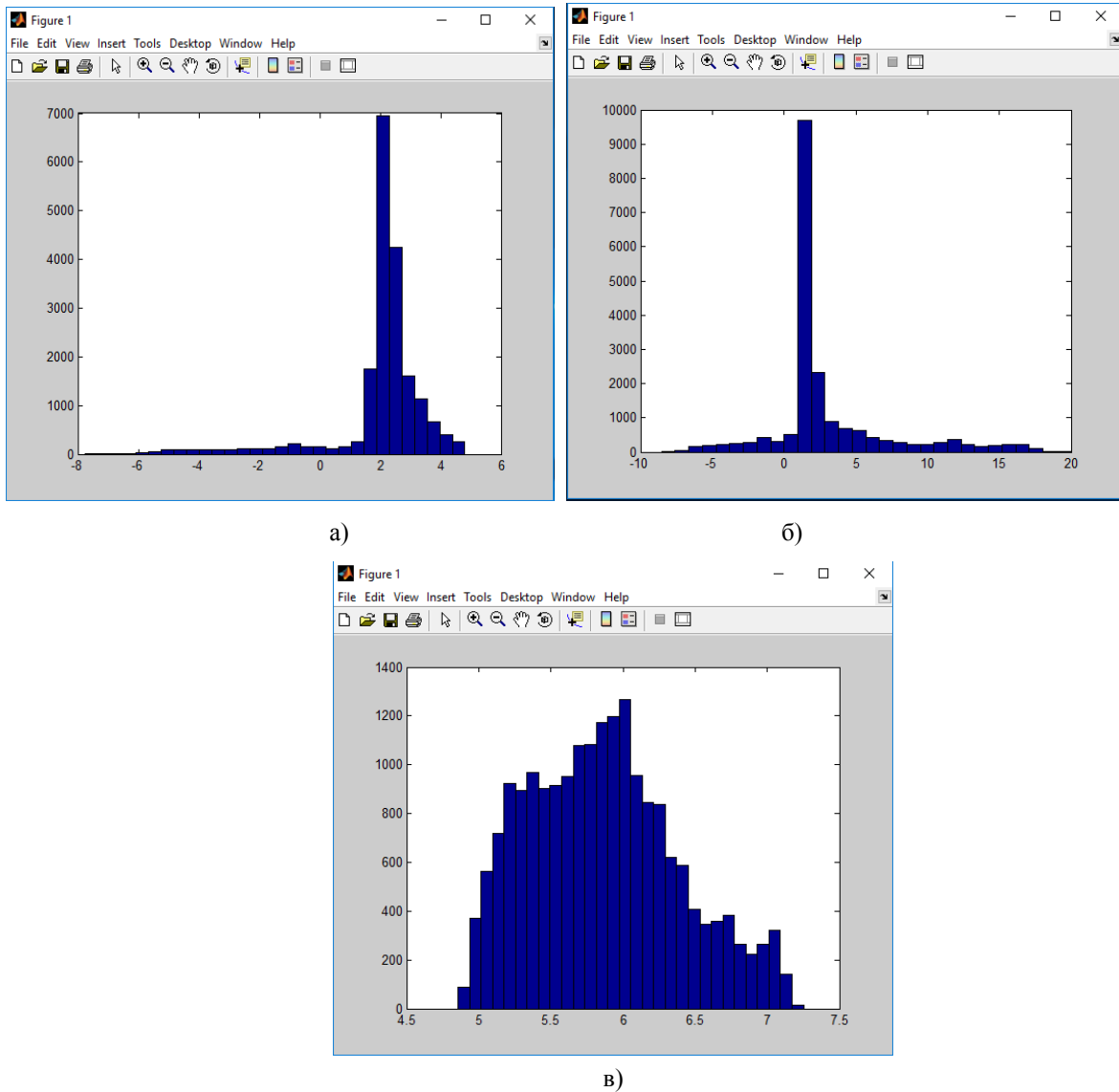


Рис. 6. Гістограми функції ймовірності розподілу по рівню генерованих хаотичних імпульсів напруги: а) на базі транзистора U1, б) на колекторі транзистора U1, в) на аноді світлодіоду LED1

Аналіз отриманих хаотичних часових рядів здійснено за методом, який запропонований Грассбергером і Прокаччі [4]. Згідно теорії Такенса [5, 6] вимірювані часові ряди можуть бути використані для реконструкції початкового фазового простору [7]. Спочатку потрібно обчислити кореляційний інтеграл  $C(r)$  модельованого вихідного сигналу [8] для  $\lim(r) = 0$  і  $\lim(N) = \infty$  (де  $N$  – кількість відповідних точкових часових рядів):

$$C(r) = \frac{1}{N_{pairs}} \sum_{\substack{l=1, \\ j=l+W}}^N H(r - \overline{X}_l - \overline{X}_j), \quad (1)$$

де  $W$  – вікно Тілера,  $H$  – функція Хевісайда, а параметр  $N_{pairs}$  визначається як [8]

$$N_{pairs} = \frac{2}{(N - m + 1)(N - m + W + 1)}, \quad (2)$$

де  $m$  – розмір вкладок.

Підсумовування в (1) підраховує кількість пар векторів сигналів  $(\bar{X}_i, \bar{X}_j)$  для яких відстань, тобто евклідова норма  $\|\bar{X}_i - \bar{X}_j\|$  менша ніж  $r$  в  $m$ -розмірному евклідовому просторі. Розглядаючи розмірний простір, кожен вектор  $\bar{X}_i$  буде заданий як [8]

$$\bar{X}_i = \{V(t_i), V(t_i + \tau), V(t_i + 2\tau), \dots, V(t_i + (m-1)\tau)\} \quad (3)$$

і являє собою точку  $m$ -мірного фазового простору, в якій вбудований кожен час. У рівнянні (3)  $\tau$  – коефіцієнт часу затримки, визначений першим мінімумом взаємної інформаційної функції  $I(\tau)$  і визначений як [8]

$$\tau = l \cdot \Delta t, \quad l = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

де  $\Delta t$  – час вибірки. На рис. 7 і рис. 8 зображені відповідно графіки середньої взаємної інформаційної функції  $I(\tau)$  та кореляційної функції  $CR(\tau)$  за час затримки  $\tau$ , які побудовані за методикою [8].

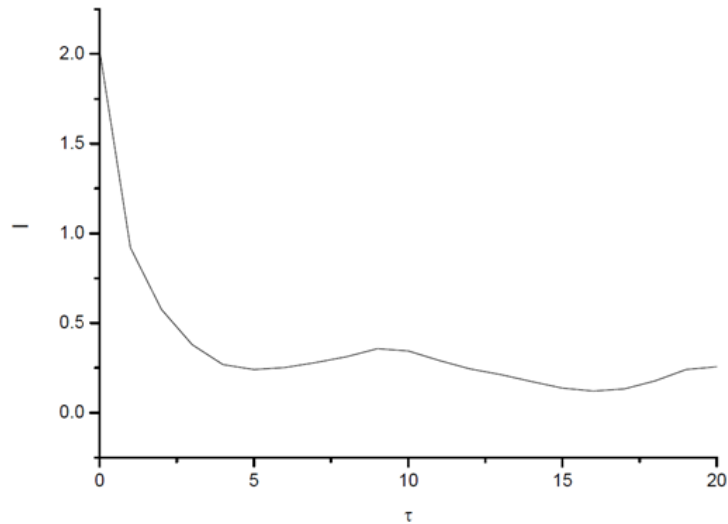


Рис. 7. Середня взаємна інформаційна функція  $I(\tau)$  за час затримки  $\tau$  [8]

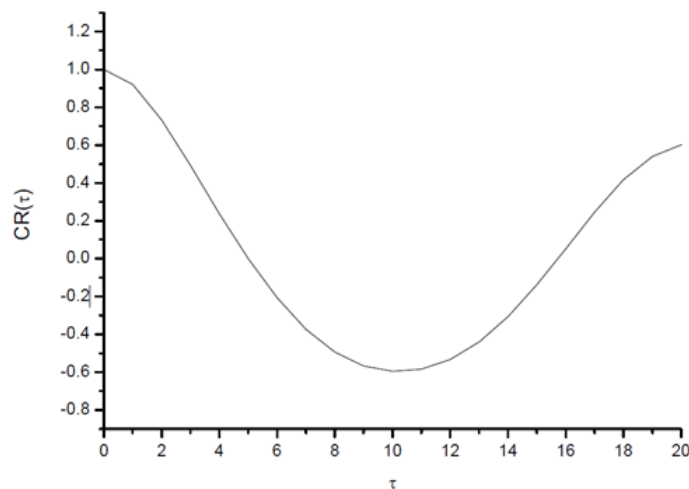


Рис. 8. Кореляційна функція  $CR(\tau)$  за час затримки  $\tau$  [8]

## ВИСНОВКИ

У роботі запропоновано нову схему малопотужного оптико-електронного генератору детермінованого хаосу на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним опором, яка має малий час встановлення стаціонарних коливань (699,68...700,942 мкс). За допомогою пакету програм Multisim 10.1 здійснено комп'ютерне схемотехнічне дослідження параметрів і характеристик генерованих електричних коливань у хаотичному режимі. Отримано фазові портрети генератору, часові діаграми, частотні та статистичні характеристики генерованих хаотичних коливань. У порівнянні з аналогами запропонований та досліджений оптико-електронний генератор детермінованого хаосу має покращену навантажувальну здатність і вищу швидкодію.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ludovico Minati. Atypical transistor-based chaotic oscillators: Design, realization, and diversity / Ludovico Minati, Mattia Frasca, Paweł Oświęcimka, Luca Faes, Stanisław Drożdż // CHAOS. – 2017. – Vol. 27, 073113 (2017). – Pp. 073113-1 – 073113-13.
2. Дмитриев А. С. Транзисторные генераторы хаоса малой мощности / А. С. Дмитриев, Е. Е. Ефремова, А. Ю. Никишов, А. И. Панас // Известия вузов «Прикладная нелинейная динамика». – 2008. – Т. 16. – №3. – С. 56-70.
3. Haniyas M. P. Time series cross prediction in a single transistor chaotic circuit / M. P. Haniyas, G. S. Tombras // Chaos, Solitons and Fractals. 2009. – Vol. 41. – Pp. 1167-1173.
4. Haniyas M. P. Time series analysis in a single transistor chaotic circuit / M. P. Haniyas, G. S. Tombras // Chaos, Solitons and Fractals. – 2009. – Vol. 40. – Pp. 246-256.
5. Haniyas M. P. Chaotic Behavior of Transistor Circuits / M. P. Haniyas, H. E. Nistazakis, G. S. Tombras // Chapter 4 in Understanding Complex Systems, July 2012. – Pp. 59-91.
6. Haniyas M. P. Simple Chaotic Electronic Circuits / M. P. Haniyas, G. S. Tombras // Chapter 4 in Chaos Synchronization and Cryptography for Secure Communications: Applications for Encryption. – Hershey: New York, 2011. – Pp. 68-90.
7. Haniyas M. P. Chaotic operation by a single transistor circuit in the reverse active region / M. P. Haniyas, I. L. Giannis, G. S. Tombras // American Institute of Physics, CHAOS. – 2010. – Vol. 20, 013105 (2010). – Pp. 013105-1 – 013105-8.
8. Haniyas M. P. Optoelectronic Chaotic Circuits / M. P. Haniyas, H. E. Nistazakis, G. S. Tombras // Chapter 28-in Optoelectronic Devices and Properties, April 2011. – Pp. 631-650.
9. Осадчук О. В. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором : монографія / О. В. Осадчук. – Вінниця : Універсум-Вінниця, 2000. – 303 с.
10. Осадчук В. С. Температурні та оптичні мікроелектронні частотні перетворювачі : монографія / Осадчук В. С., Осадчук О. В., Вербицький В. Г. – Вінниця : Універсум-Вінниця, 2001. – 195 с.
11. Volodymyr Kucheruk. RL-diode generator of chaotic oscillations as resistance – voltage converter | [Generator oscylacji chaotycznych o układzie RL- dioda jako przetwornik rezystancja – napięcie] / Volodymyr Kucheruk, Zygmunt L. Warsza, Volodymyr Sevastyanow, Wiktoria Mankowska // PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, R. 89 NR 10/2013, 2013. – Pp. 266-269.
12. Volodymyr Kucheruk. Deterministic chaos in RL-diode circuits and its application in metrology / Volodymyr Kucheruk, Samuil Katsyv, Mykhailo Glushko, Waldemar Wojcik, Tomasz Zyska, Kyrmyzy Taissariyevac, Kanat Mussabekov // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. Proceedings Volume 10031, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2016; 100312A (2016); doi: 10.1117/12.2249253 Event: Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2016, Wilga, Poland, 2016. – Pp. 1-8.
13. Andriy Semenov. Radiofrequency Deterministic Chaos Oscillator Based on a Transistor Structure with Negative Resistance. Numerical Researching / 2017 XI International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT), Kyiv, Ukraine. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. May 24, 2017. – May 27, 2017. – Pp. 343-347.
14. Andriy Semenov. Modeling the Deterministic Chaos Microelectronic Oscillator Based on the Bipolar Transistor Structure with Negative Resistance / Andriy Semenov, Oleksandr Osadchuk // 2017 IEEE First Ukraine Conference on ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING (UKRCON). Conference Proceedings. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. May 29 – June 2, 2017. Kyiv, Ukraine. – Pp. 704-708.



## REFERENCES

1. Ludovico Minati. Atypical transistor-based chaotic oscillators: Design, realization, and diversity / Ludovico Minati, Mattia Frasca, Paweł Oświęcimka, Luca Faes, Stanisław Drożdż // CHAOS. – 2017. – Vol. 27, 073113 (2017). – Pp. 073113-1 – 073113-13.
2. Dmitriev A. S. Tranzistornye generatory khaosa maloi moshchnosti / A. S. Dmitriev, E. E. Efremova, A. Yu. Nikishov, A. I. Panas // Izvestiya vuzov «Prikladnaya nelineinaya dinamika». – 2008. – T. 16. – No 3. – Pp. 56-70.
3. Haniyas M. P. Time series cross prediction in a single transistor chaotic circuit / M. P. Haniyas, G. S. Tombras // Chaos, Solitons and Fractals. 2009. – Vol. 41. – Pp. 1167-1173.
4. Haniyas M. P. Time series analysis in a single transistor chaotic circuit / M. P. Haniyas, G. S. Tombras // Chaos, Solitons and Fractals. – 2009. – Vol. 40. – Pp. 246-256.
5. Haniyas M. P. Chaotic Behavior of Transistor Circuits / M. P. Haniyas, H. E. Nistazakis, G. S. Tombras // Chapter 4 in Understanding Complex Systems, July 2012. – Pp. 59-91.
6. Haniyas M. P. Simple Chaotic Electronic Circuits / M. P. Haniyas, G. S. Tombras // Chapter 4 in Chaos Synchronization and Cryptography for Secure Communications: Applications for Encryption. – Hershey: New York, 2011. – Pp. 68-90.
7. Haniyas M. P. Chaotic operation by a single transistor circuit in the reverse active region / M. P. Haniyas, I. L. Giannis, G. S. Tombras // American Institute of Physics, CHAOS. – 2010. – Vol. 20, 013105 (2010). – Pp. 013105-1 – 013105-8.
8. Haniyas M. P. Optoelectronic Chaotic Circuits / M. P. Haniyas, H. E. Nistazakis, G. S. Tombras // Chapter 28 in Optoelectronic Devices and Properties, April 2011. – Pp. 631-650.
9. Osadchuk O. V. Mikroelektronni chastotni peretvoriuvachi na osnovi tranzystornykh struktur z vid'iemnym oporom : monohrafiia / O. V. Osadchuk. – Vinnytsia : Universum-Vinnytsia, 2000. – 303 s.
10. Osadchuk V. S. Temperaturni ta optychni mikroelektronni chastotni peretvoriuvachi : monohrafiia / Osadchuk V. S., Osadchuk O. V., Verbytskyi V. H. – Vinnytsia : Universum-Vinnytsia, 2001. – 195 s.
11. Volodymyr Kucheruk. RL-diode generator of chaotic oscillations as resistance - voltage converter | [Generator oscylacji chaotycznych o układzie RL- dioda jako przetwornik rezystancja - napiecie] / Volodymyr Kucheruk,, Zygmunt L. Warsza, Volodymyr Sevastyanow, Wiktoria Mankowska // PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, R. 89 NR 10/2013, 2013. – Pp. 266-269.
12. Volodymyr Kucheruk. Deterministic chaos in RL-diode circuits and its application in metrology / Volodymyr Kucheruk, Samuil Katsyv, Mykhailo Glushko, Waldemar Wojcik, Tomasz Zyska, Kyrmyzy Taissariyevac, Kanat Mussabekov // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. Proceedings Volume 10031, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2016; 100312A (2016); doi: 10.1117/12.2249253 Event: Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2016, Wilga, Poland, 2016. – Pp. 1-8.
13. Andriy Semenov. Radiofrequency Deterministic Chaos Oscillator Based on a Transistor Structure with Negative Resistance. Numerical Researching / 2017 XI International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT), Kyiv, Ukraine. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. May 24, 2017. – May 27, 2017. – Pp. 343-347.
14. Andriy Semenov. Modeling the Deterministic Chaos Microelectronic Oscillator Based on the Bipolar Transistor Structure with Negative Resistance / Andriy Semenov, Oleksandr Osadchuk // 2017 IEEE First Ukraine Conference on ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING (UKRCON). Conference Proceedings. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. May 29 – June 2, 2017. Kyiv, Ukraine. – Pp. 704-708.

Надійшла до редакції 24.06.2017р.

**СЕМЕНОВА АНДРІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ** – к.т.н., доцент, докторант кафедри радіотехніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна, E-mail: [semenov.a.o@vntu.edu.ua](mailto:semenov.a.o@vntu.edu.ua)