

# ПОБУДОВА БІФУРКАЦІЙНИХ ДІАГРАМ НА ОСНОВІ СИГНАЛІВ ГЕНЕРАТОРІВ ДИНАМІЧНОГО ХАОСУ ОТРИМАНИХ З MULTISIM

Вінницький національний технічний університет

## **Анотація**

*У роботі розглядається можливість побудови біфуркаційних діаграм за допомогою даних, отриманих під час моделювання генераторів динамічного хаосу в середовищі Multisim. Як тестову схему обрано генератор динамічного хаосу Чуа на основі гіратора та наведено діаграми за даними з двох точок схеми. Застосовується плавна та дискретна зміна параметрів елементів у досліджуваній схемі. Для аналізу даних використано вбудовані можливості Excel, наведено алгоритм дій для вирішення проблеми прямого експорту даних тривалих сигналів та код програми для Visual Basic for Applications (VBA).*

**Ключові слова:** динамічний хаос, атрактор, генератор, біфуркаційна діаграма, пристрій, сигнал, моделювання, Multisim, VBA.

## **Abstract**

*The paper considers the possibility of constructing bifurcation diagrams using data obtained during the simulation of dynamic chaos generators in the Multisim environment. The Chua dynamic chaos generator based on the gyrator was chosen as a test scheme and diagrams are presented based on data from two points of the scheme. A smooth and discrete change in the parameters of the elements in the studied scheme is used. For data analysis, the built-in capabilities of Excel are used, an algorithm of actions for solving the problem of direct export of long-term signal data and the program code for Visual Basic for Applications (VBA) are presented.*

**Keywords:** dynamic chaos, attractor, generator, bifurcation diagram, device, signal, simulation, Multisim, VBA.

## **Вступ**

Під час аналізу нелінійних систем виникає потреба не тільки фіксувати поточний стан системи за допомогою побудови атракторів чи перерізу Пуанкаре, а й передбачати її поведінку у разі зміни номіналів елементів через дрейф параметрів, зумовлений температурними чи іншими зовнішніми впливами [1, 2]. Таким чином, змінюючи один із параметрів системи (або декілька відразу) і фіксуючи певний поріг напруги (наприклад, піки сигналу) в обраній точці схеми, можна побудувати діаграму подвоєння періоду, відому як біфуркаційна діаграма. На ній у широких межах можна побачити діапазон параметрів, за яких спостерігається граничний цикл, хаотична поведінка, початкові області подвоєння періоду та вікна прозорості (перехід від хаотичної поведінки до граничного циклу). Фактично, біфуркаційна діаграма є одновимірним описом стану системи, яка під час переходу у 3D-простір і додаванні на діаграму напругу піків другого елемента перетворюється на еволюцію перерізу Пуанкаре чи 1D-карти за зміни номіналу елементів [3]. Проблемою симуляторів електронних схем, таких як Multisim чи LTspice, є відсутність Z-осі у вбудованих віртуальних осцилографах чи можливості накопичувати точки в їхній пам'яті, що критично важливо у разі зміни номіналу елемента в широких межах. Рішенням може бути використання сторонніх програм для аналізу отриманих після моделювання даних, таких як Excel чи Matlab [4]. У цій роботі пропонується використати вбудовані в Excel можливості Visual Basic for Applications (VBA) та наведено код програми для фільтрації даних на позитивні піки й подальшої побудови на їх основі біфуркаційної діаграми. Для перевірки правильності роботи алгоритму обрано одну з класичних схем Чуа та проведено перевірку у двох точках схеми під час зміни чотирьох різних номіналів.

## **Результати дослідження**

Щоб перевірити алгоритм побудови біфуркаційних діаграм на основі сигналів генераторів динамічного хаосу, отриманих із Multisim, було використано одну з класичних схем Чуа на основі

гіратора, яку наведено на рисунку 1. Основна частота генератора – 3 кГц. Для зміни параметрів використовуються ідеальні моделі резисторів та конденсаторів, які керуються напругою від джерела PWL, обраного з бібліотеки елементів Multisim. Було перевірено розвиток стану системи за дискретної та неперервної зміни одного з елементів схеми.

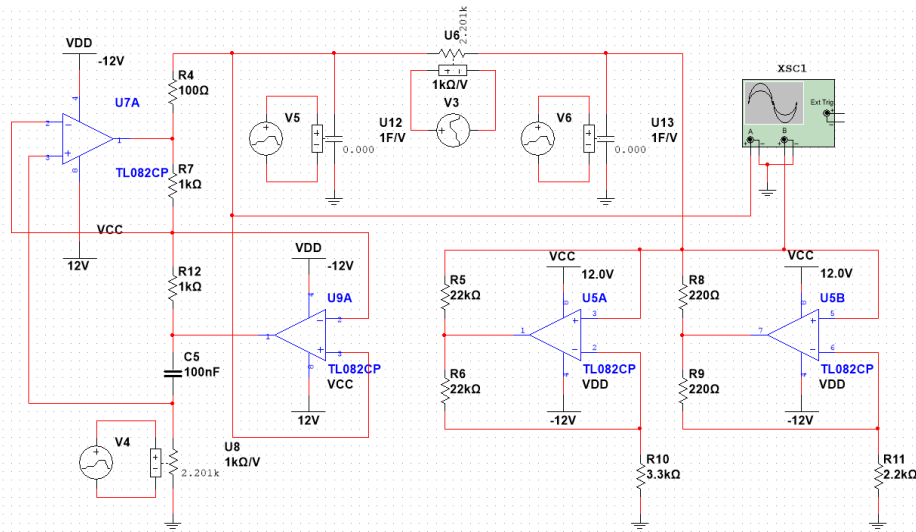


Рис. 1 – Схема Чуа на основі гіратора підготовлена до моделювання у програмі Multisim

Після проведення аналізу перехідних процесів в обраних точках схеми у Multisim необхідно зберегти дані у форматі CSV або TXT; якщо обрати пряме збереження в Excel, частина даних буде втрачена (максимум 5,2 мільйона точок), а редагування даних в один стовпчик займе багато часу. В Excel комбінацією клавіш ALT+F11 відкривається вікно VBA, створюється новий модуль, у який вводиться наведений далі код. На рисунку 2 наведено код програми для аналізу отриманих даних на позитивні та негативні піки відразу трьох сигналів, отриманих із Multisim. Код був згенерований та відредагований за допомогою штучного інтелекту Gemini. Після його використання у папці з аналізованим файлом з'являться три нові файли, кожний з яких є CSV-таблицею, яку необхідно завантажити в Excel. Для цього в Excel у вкладці «Дані» необхідно натиснути «Створити запит» і вибрати «З файлу – 3 CSV». У новому вікні буде вказано кількість рядків таблиці, необхідно натиснути «Закрити і завантажити у», далі поставити позначку у вікні «Додати ці відомості до моделі даних» і натиснути «Завантажити». З'явиться таблиця; для відображення коректної шкали зміни параметра на діаграмі необхідно додати стовпчик «Step» і ввести формулу «=Ps+((Pend-Ps)/T)\*[@Time]», де Ps, Pend і T відповідно початковий номінал елемента, кінцевий номінал елемента, загальний час моделювання. По отриманих даних будуються точкова діаграма.

```

Sub ExtractPeakMultiSignal()
Dim fd As Object
Dim filePath As String, fileName As String, baseName As String
Dim fileIn As Integer
Dim lineText As String
Dim vPrev() As Double, vCurr() As Double, vNext() As Double
Dim peakCounts() As Long

' Domain arrays for file operations and time window algorithm
Dim fileOut() As Integer
Dim outPaths() As String
Dim vPrev() As Double, vCurr() As Double, vNext() As Double
Dim peakCounts() As Long

ReDim vPrev(1 To numSignals), vCurr(1 To numSignals), vNext(1 To numSignals)
ReDim peakCounts(1 To numSignals)

Set folderPath As String
folderPath = Left(filePath, InStrRev(filePath, "\"))

' Prepare output files for each signal
Dim safeHeader As String
For i = 1 To numSignals
    safeHeader = Replace(Replace(headers(i), "\", ""), "\", "")
    outPaths(i) = folderPath & "Bifurcation_" & baseName & "_" & safeHeader & ".csv"
    fileOut(i) = FreeFile
    Open outPaths(i) For Output As #fileOut(i)
    
    ' Write header compatible with MATLAB/Excel script ( ; separator)
    Print #fileOut(i), "Time/Peak ;" & headers(i)
Next i

' Initialize buffers to extreme negative values
vPrev() = -999999: vCurr() = -999999: vNext() = -999999
Next i

Dim t As Double

' Main loop processing the file row by row
Do While Not EOF(fileIn)
    Line Input fileIn, lineText
    lineText = WorksheetFunction.Trim(Replace(lineText, vbTab, " "))
    vals = Split(lineText, ";")
    
    ' Ensure the row has a complete set of data
    If UBound(vals) < numSignals Then
        On Error Resume Next
        t = Val(Replace(vals(1), " ", "")) ' Time axis
        If Err.Number = 0 And t > 0 Then
            ' Independent calculations for each signal
            For i = 1 To numSignals
                ' Shift time window
                vPrev(i) = vCurr(i)
                vCurr(i) = vNext(i)
                vNext(i) = t
            Next i
        End If
    End If
End Do

' Close all files
Close #fileIn
For i = 1 To numSignals
    Close #fileOut(i)
Next i

' Final report
Dim msg As String
msg = "Processing complete" & vbCrLf & "Base files: Bifurcation_" & baseName & vbCrLf & vCurr(i)
For i = 1 To numSignals
    msg = msg & headers(i) & " -> Peaks found: " & peakCounts(i) & vbCrLf
Next i
MsgBox msg, vbInformation, "Extraction Statistics"
End Sub

```

Рис. 2 – Лістинг програми VBA для формування таблиці пікових напруг сигналу з обраного файлу

На рисунку 3 (а, б) наведено біфуркаційні діаграми, отримані після аналізу напруги першого конденсатора під час зміни одного з резисторів гіратора, який імітує індуктивність. При цьому зміна номіналу відбувалася неперервно у випадку (а) і дискретно у випадку (б), час моделювання в обох випадках дорівнював 16 секунд. Основний потенціометр схеми Чуа мав номінал 1760 Ом, а конденсатори мали номінали 100 нФ і 10 нФ. Діапазон параметрів був обраний 1.5–2.14 кОм у випадку (а) і 1.35–2.34 кОм у випадку (б). Крок параметра за дискретної зміни становив 10 Ом. Основною відмінністю є плавність і точність діаграми, а також час, необхідний для завершення моделювання (у випадку дискретної зміни параметра він менший).

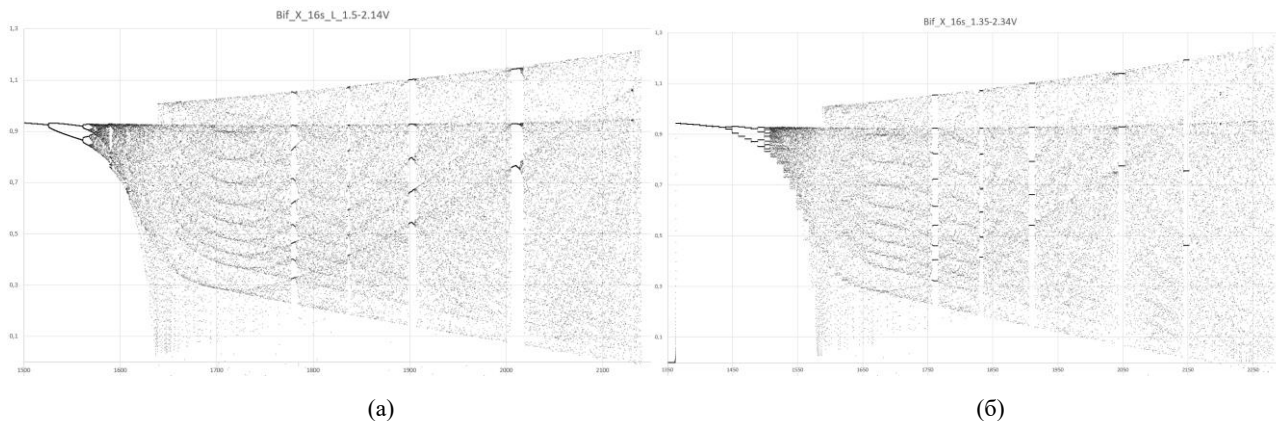


Рис. 3 – Отримані біфуркаційні діаграми при неперервній (а) і дискретній (б) зміні індуктивності за допомогою гіратора

На рисунку 4 (а, б) наведено діаграму, отриману після аналізу напруги другого конденсатора під час зміни номіналу головного потенціометра схеми Чуа. Резистор гіратора мав номінал 2 кОм, а конденсатори мали номінали 100 нФ і 10 нФ в обох випадках. Зміна номіналу відбувалася неперервно у випадку (а), час дорівнював 16 секунд, діапазон зміни номіналу становив 1.62–2.2 кОм. За дискретної зміни у випадку (б) час дорівнював 3.5 секунди, діапазон зміни номіналу становив 1.65–2.14 кОм із кроком 10 Ом. Отримані результати вказують на необхідність використовувати неперервний діапазон для якісної діаграми або дискретний із меншим кроком і більшим часом. Також важливо зауважити явище співіснування атракторів (різниця у виборі траєкторією кінцевої гілки залежно від стану системи) та залежність від початкових умов. У випадку (б) велику частину часу система перебуває у стабільному режимі і тільки за великого номіналу головного потенціометра раптово переходить у хаос, на відміну від варіанта (а).

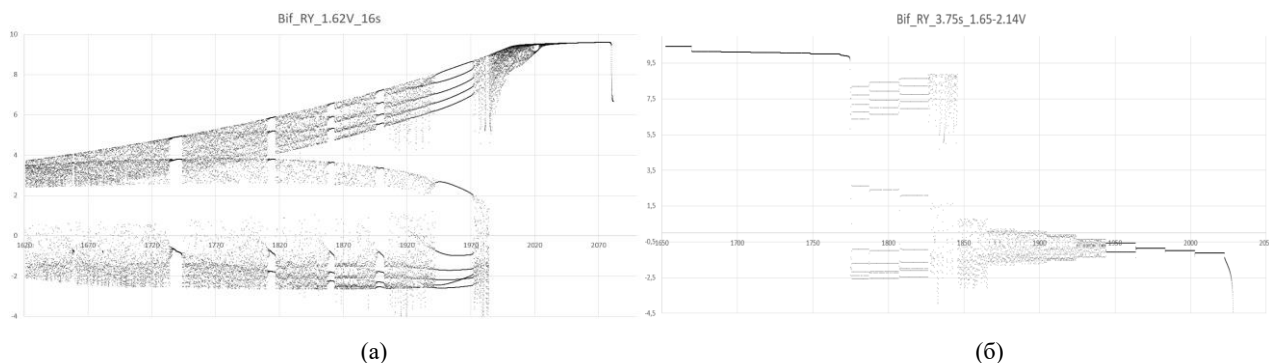


Рис. 4 – Відображення біфуркаційних діаграм при неперервній (а) і дискретній (б) зміні головного потенціометру

На рисунку 5 (а, б) наведено діаграму, отриману після аналізу напруги першого конденсатора під час зміни номіналу першого та другого конденсаторів схеми. При цьому зміна номіналу відбувалася неперервно в обох випадках і її час дорівнював 16 секунд. Резистор гіратора мав номінал 2 кОм, основний потенціометр – 1760 Ом в обох випадках. Перший конденсатор змінював параметри в межах 50–150 нФ, другий – в межах 10–14 нФ. Варіант (а) мало чим відрізняється від того ж варіанта на рисунку 3 (а). Слід зазначити, що реальний час моделювання становив 6 і 8 годин відповідно. Наведені біфуркаційні діаграми побудовано і наведено тільки для двох точках схеми, оскільки діаграми, побудовані з напруги першого конденсатора і напруги на індуктивності (на резисторі гіратора), збігаються.

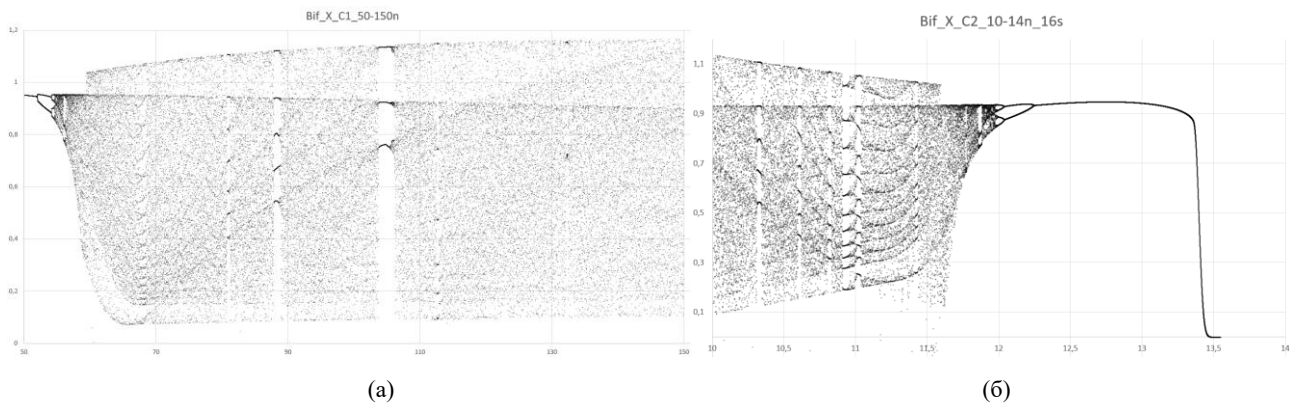


Рис. 5 – Отримані біфуркаційні діаграми при зміні параметрів першого (а) і другого (б) конденсатора в схемі Чуа

## Висновки

Запропонований алгоритм дій дозволяє досліджувати будь-який генератор динамічного хаосу за допомогою побудови біфуркаційних діаграм, змінюючи номінали елементів у широких межах. Зменшення діапазону номіналів елементів та збільшення часу моделювання дозволяють побудувати більш точну діаграму, причому краще використовувати неперервну зміну параметрів. Виявлені програмні обмеження Multisim не дозволяють проводити зміну номіналів довше ніж 16 секунд у разі відображення 1 сигналу, до того ж максимальний час моделювання скорочується за відображення більшої кількості сигналів під час проведення аналізу перехідних процесів. У разі спроби провести моделювання довше зазначеного часу виводиться помилка про перевищення пам'яті програми, яку не можна збільшити за рахунок оперативної чи жорсткої пам'яті персонального комп'ютера. Іншим недоліком є 32-бітна архітектура програми, яка не використовує більше одного ядра процесора; через це моделювання може тривати від 1 до 8 годин реального часу, залежно від обчислювальної потужності ядра процесора і налаштувань самого моделювання (TMAX, RELTOL, TRTOL і т. д.). Для прискорення моделювання краще використовувати метод обчислення «Gear». Також помічено помилки під час спроби зберегти графік в окремий файл для подальшого перегляду та збільшення часу моделювання під час аналізу змішаних схем (цифрові та аналогові частини). Хоча наведений метод може успішно використовуватися для побудови біфуркаційних діаграм, рекомендується використовувати симулятор LTspice, який не має всіх вищезазначених проблем та виконує моделювання максимально швидко, а аналіз даних проводити в середовищі Matlab.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Algorithm for generating bifurcation diagrams using poincaré intersection plane / L. J. Ontañón-García et al. *Mathematics*. 2025. Vol. 13, no. 11. P. 1818. DOI: <https://doi.org/10.3390/math13111818>
2. Semenov A. O., Khloba A. A. Review of circuit solutions leading to deterministic chaos in oscillators based on the van der pol equation. *Scientific notes of taurida national V.I. vernadsky university. series: technical sciences*. 2025. Vol. 1, no. 2. P. 149–157. URL: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/22>
3. Marszalek W., Walczak M. Bifurcation diagrams of nonlinear oscillatory dynamical systems: A brief review in 1D, 2D and 3D. *Entropy*. 2024. Vol. 26, no. 9. P. 770. DOI: <https://doi.org/10.3390/e26090770>
4. Comparison of bifurcation diagrams for numerical and analog chaotic systems / T. I. Karimov et al. *2021 IEEE conference of russian young researchers in electrical and electronic engineering (elconrus)*, St. Petersburg, Moscow, Russia, 26–29 January 2021. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1109/elconrus51938.2021.9396558>

**Хльоба Антон Анатолійович** — аспірант, група 172-24а, кафедра інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: [hlobaanton@gmail.com](mailto:hlobaanton@gmail.com)

**Семенов Андрій Олександрович** — д-р техн. наук, професор, професор кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: [semenov.a.o@vntu.edu.ua](mailto:semenov.a.o@vntu.edu.ua)

**Khloba Anton Anatolyevich** — postgraduate student, Department of Information Radioelectronic Technologies and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [hlobaanton@gmail.com](mailto:hlobaanton@gmail.com)

**Semenov Andriy Oleksandrovych** — Dr. Sc. (Eng.), Full Professor, Professor of the Department of Information Radioelectronic Technologies and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [semenov.a.o@vntu.edu.ua](mailto:semenov.a.o@vntu.edu.ua)