

Вінницький національний технічний університет
Факультет інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем
Кафедра радіотехніки

Радіовимірювальні перетворювачі електричних величин на основі генераторів детермінованого хаосу

магістерська кваліфікаційна робота за спеціальністю
172 - «Телекомунікації та радіотехніка»,
освітня програма «Радіотехніка»

Розробив студент гр. РТ-18м Пінаєв Б. О.
керівник – д.т.н., проф. каф. РТ Семенов А. О.

Мета та завдання роботи

Метою роботи є розроблення та дослідження радіовимірвальних перетворювачів електричних величин на основі генераторів детермінованого хаосу типу Дуффінга-Холмса, що реалізовані на операційних підсилювачах.

Основними завданнями роботи є:

- аналіз неавтономного генератора Дуффінга-Холмса на операційних підсилювачах;
- стабілізація нестабільної періодичної орбіти фазового портрету в неавтономному хаотичному генераторі Дуффінга-Холмса на операційних підсилювачах;
- вибір та обґрунтування електричної схеми автономного генератора Дуффінга-Холмса на операційних підсилювачах;
- розробка комп'ютерної моделі автономного генератора Дуффінга-Холмса на операційних підсилювачах і дослідження динаміку його електричних коливань;
- проведення комп'ютерного моделювання автономного генератора Дуффінга-Холмса на операційних підсилювачах і дослідження динаміку його електричних коливань;
- економічні розрахунки, дослідження питань охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях.

Об'єкт і предмет досліджень, апробація та публікації

Об'єкт дослідження – процеси генерування та формування сигналів низькочастотного Дуффінг-Холмс генератора детермінованого хаосу на операційних підсилювачах.

Предмет дослідження – часові та частотні параметри і характеристики сигналів низькочастотного Дуффінг-Холмс генератора детермінованого хаосу на операційних підсилювачах.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота проводилася згідно з напрямками дослідження в рамках прикладних держбюджетних науково-дослідних робіт 32-Д-389 «Методи та пристрої формування, оброблення й вимірювання сигналів радіоінформаційних систем промислових і військових об'єктів» (номер державної реєстрації 0117U007139

Апробація результатів роботи.

- 1) XLVII регіональній науково-технічній конференції ВНТУ (м. Вінниця, 9-10 березня 2018, ВНТУ).
- 2) міжнародних науково-технічних конференцій «Інформаційно-комп'ютерні технології – 2019» (м. Житомир, 18–20 квітня 2019 р., ЖДТУ);
- 3) «Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем» (м. Вінниця, 14-16 листопада 2019 року, ВНТУ).

Публікації результатів наукових досліджень. За темою досліджень автором опубліковано **4** статті у виданнях з індексованих у науково-метричній базі Скопус та **3** тези доповідей.

Відображення Пуанкаре

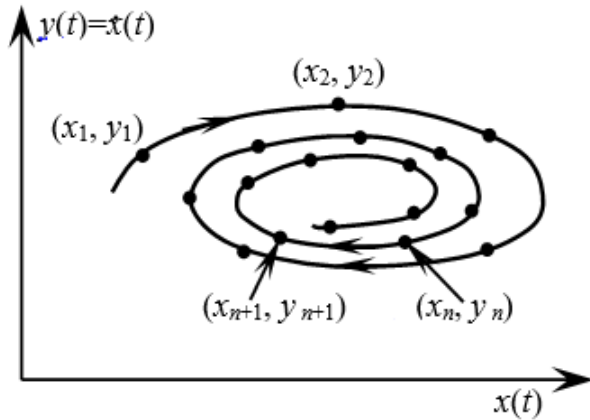


Рис. 1. Схематична ілюстрація часової еволюції точок Пуанкаре з вибірки цифрових вимірювань

Припустимо, що ми аналізуємо рух частинки, відображене на фазовій площині $[x(t), (t)]$. Якщо рух хаотично, то траєкторія прагне заповнити деяку область фазового простору. Якщо, замість того, щоб неперервно стежити за рухом, ми будемо фіксувати динамічні характеристики тільки в окремі моменти, то рух буде представлено послідовністю точок фазової площини (рис. 1). Якщо $x_n \equiv x(t_n)$ і $y_n \equiv (t_n)$, то ця послідовність точок фазового простору є двовимірне відображення

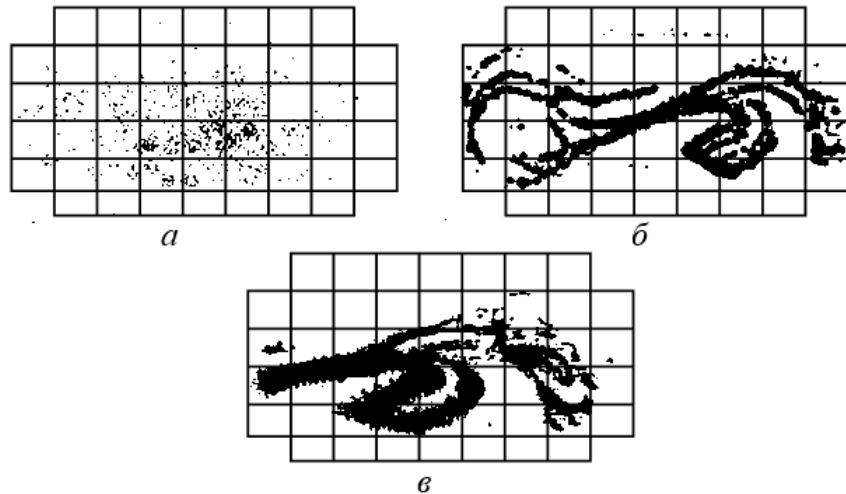


Рис. 2. Відображення Пуанкаре для хаотичного руху поздовжньо вигнутого стрижня при: а) - слабкому загасанні; б), в) - сильному загасанні виявляють фрактальну структуру дивного атратора

$$\begin{aligned} x_{n+1} &= f(x_n, y_n), \\ y_{n+1} &= g(x_n, y_n). \end{aligned} \quad (1)$$

Якщо моменти вибірки t_n підкоряються певним правилом, це відображення називається відображенням Пуанкаре.

Площина Пуанкаре

Вимушені нелінійні коливання
неавтономної коливальної системи

$$\begin{aligned} \dot{x} &= y, \\ \dot{y} &= F(x, y) + f_0 \cos(\omega \cdot t + \phi_0). \end{aligned} \quad (1)$$

Цю систему можна привести до
автономного виду, вводючи значення

$$z = \omega \cdot t + \phi_0 + 2n\pi, \quad (2)$$

що дає

$$\begin{aligned} \dot{x} &= y, \\ \dot{y} &= F(x, y) + f_0 \cos z, \\ \dot{z} &= \omega. \end{aligned} \quad (3)$$

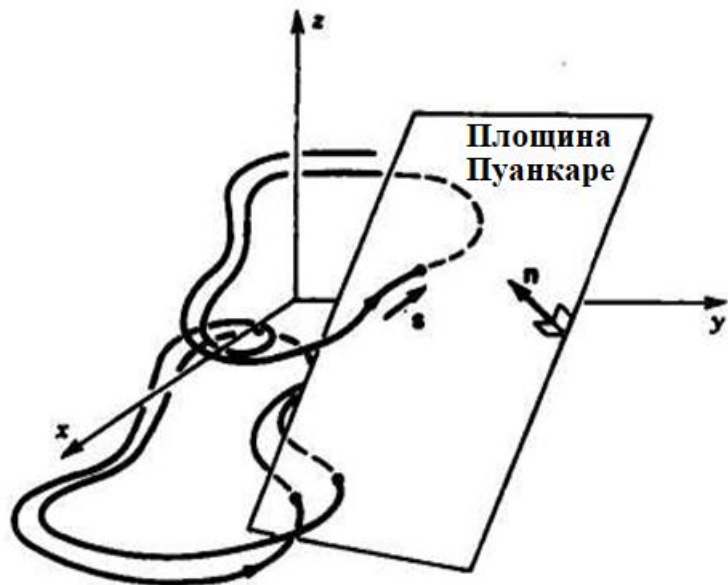


Рис. 1. Схематичне зображення траєкторій системи рівнянь третього порядку і типової площини Пуанкаре

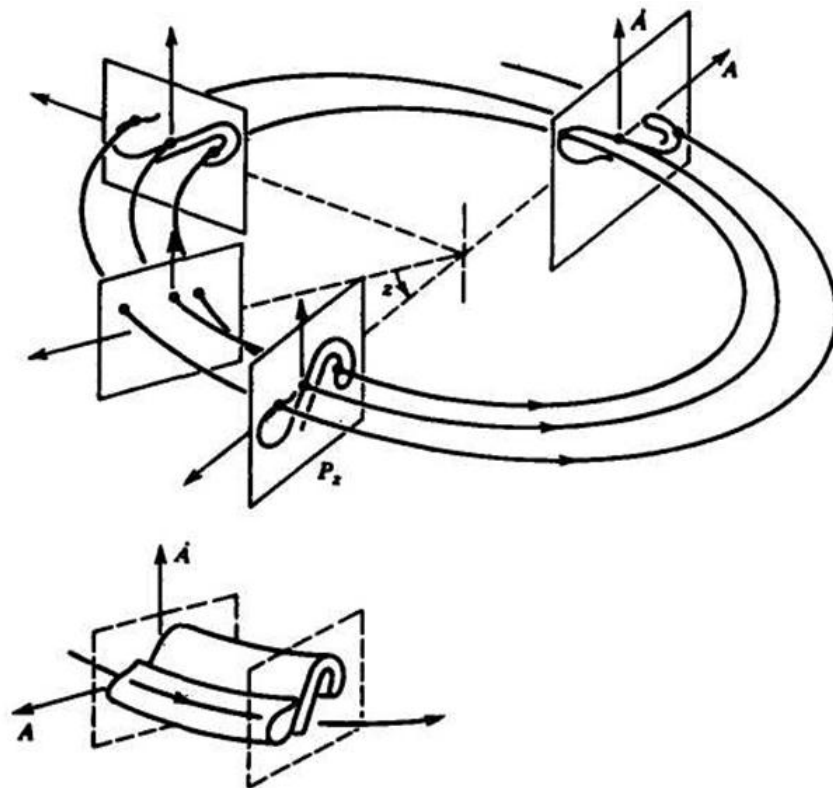


Рис. 2. Схематичне зображення дивного аттрактора для вимушених коливань нелінійного осцилятора - «створення» площини Пуанкаре і фази сигналу збудження

Електрична схема неавтономного генератора типу Дуфінг-Холмс та його математична модель

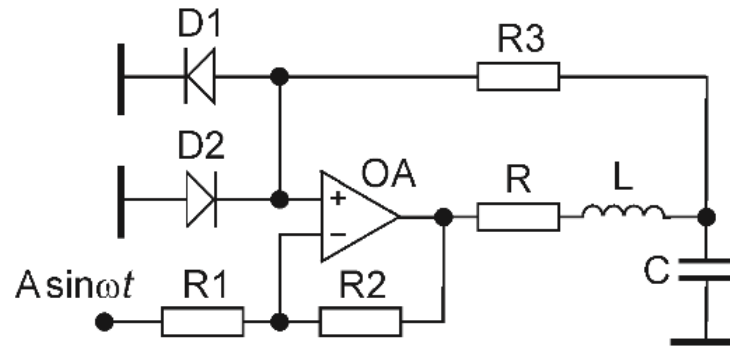


Рисунок 1 – Електрична схема генератора Дуффінга-Холмса

Диференціальні рівняння, що описують схему, мають вигляд

$$C \frac{dV_C}{dt} = I_L,$$

$$L \frac{dI_L}{dt} = F_E(V_C) - I_L R + A \sin(\omega t - \pi),$$

де V_C – напруга на конденсаторі C , а I_L – струм через індуктивність L .

Нелінійна функція $F_E(V_C)$

$$F_E(V_C) = \begin{cases} -(V_C + kV^*), & V_C < -V^*, \\ (k-1)V_C, & -V^* \leq V_C \leq V^*, \\ -(V_C - kV^*), & V_C > V^*, \end{cases}$$

Результати чисельного дослідження неавтономного генератора Дуффінга-Холмса

У нормованих змінних диференціальні рівняння, що описують схему, мають вигляд

$$\dot{x} = y,$$

$$\dot{y} = F(x) - by + a \sin \omega t$$

де $F(x) = x - x^3$

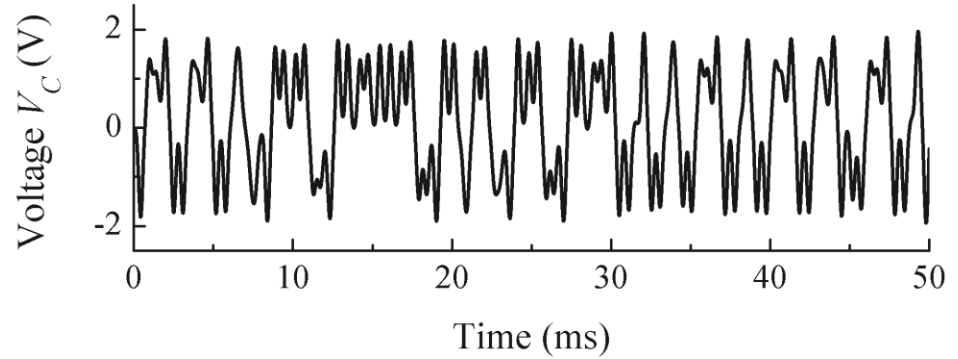
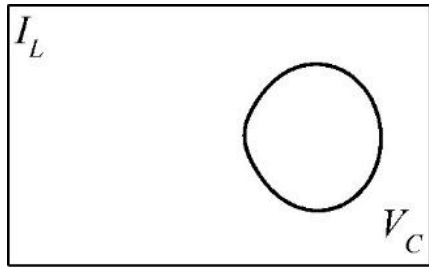
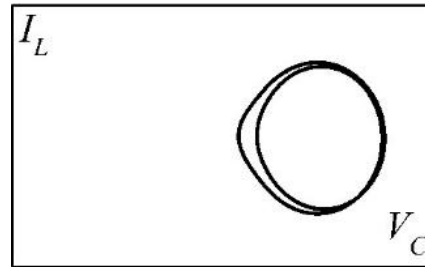


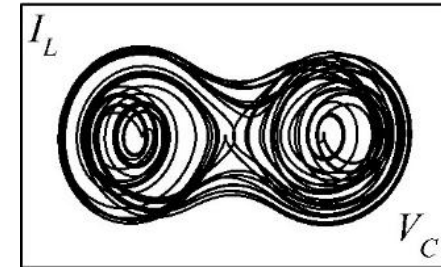
Рисунок 1 – Хаотична форма сигналу $V_C(t)$, $A = 240$ мВ



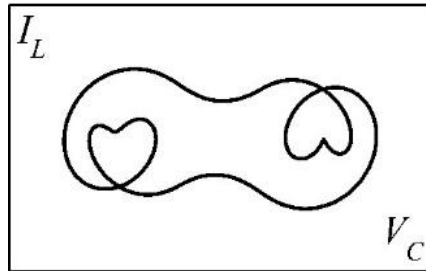
а)



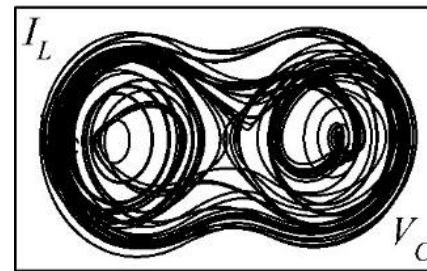
б)



в)



г)



д)

Рисунок 2 - Фазові портрети при різних амплітудах:
а) 120 мВ, б) 140 мВ, в) 160 мВ, г) 196 мВ, д) 260 мВ

Результати експериментальних досліджень неавтономного генератора Дуффінга-Холмса

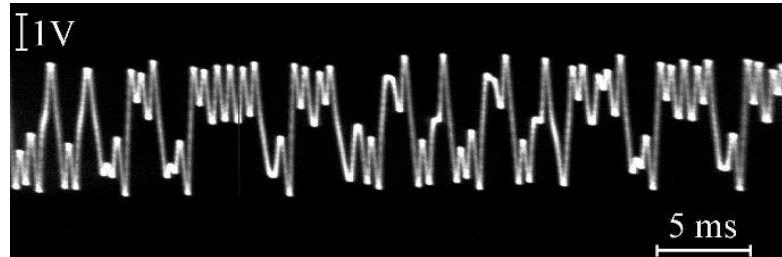


Рисунок 1 - Експериментальний хаотичний сигнал $V_C(t)$ при $A = 200$ мВ

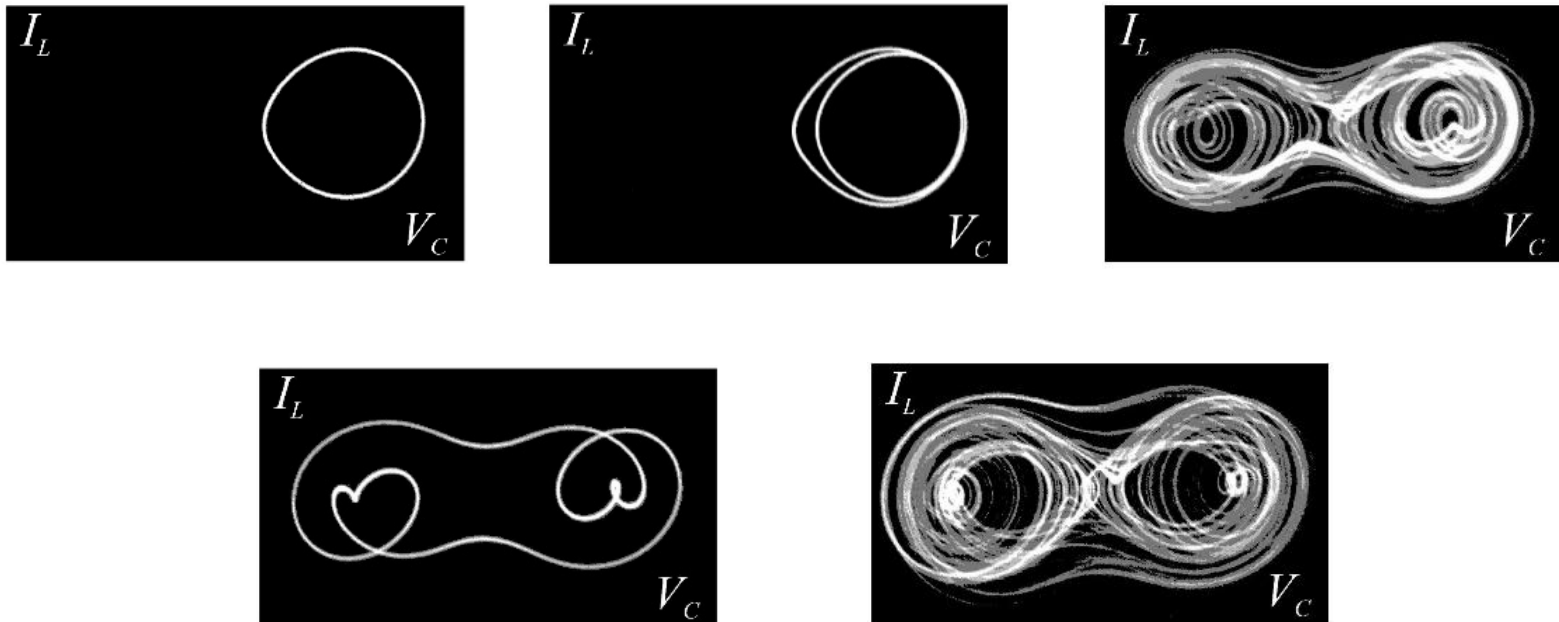


Рисунок 2 - Фазові портрети при а) $A = 120$ мВ, б) $A = 140$ мВ, в) $A = 150$ мВ,
г) $A = 160$ мВ, д) $A = 200$ мВ

Результати чисельного дослідження перерізу Пуанкаре фазових потретів неавтономного генератора Дуффінга-Холмса

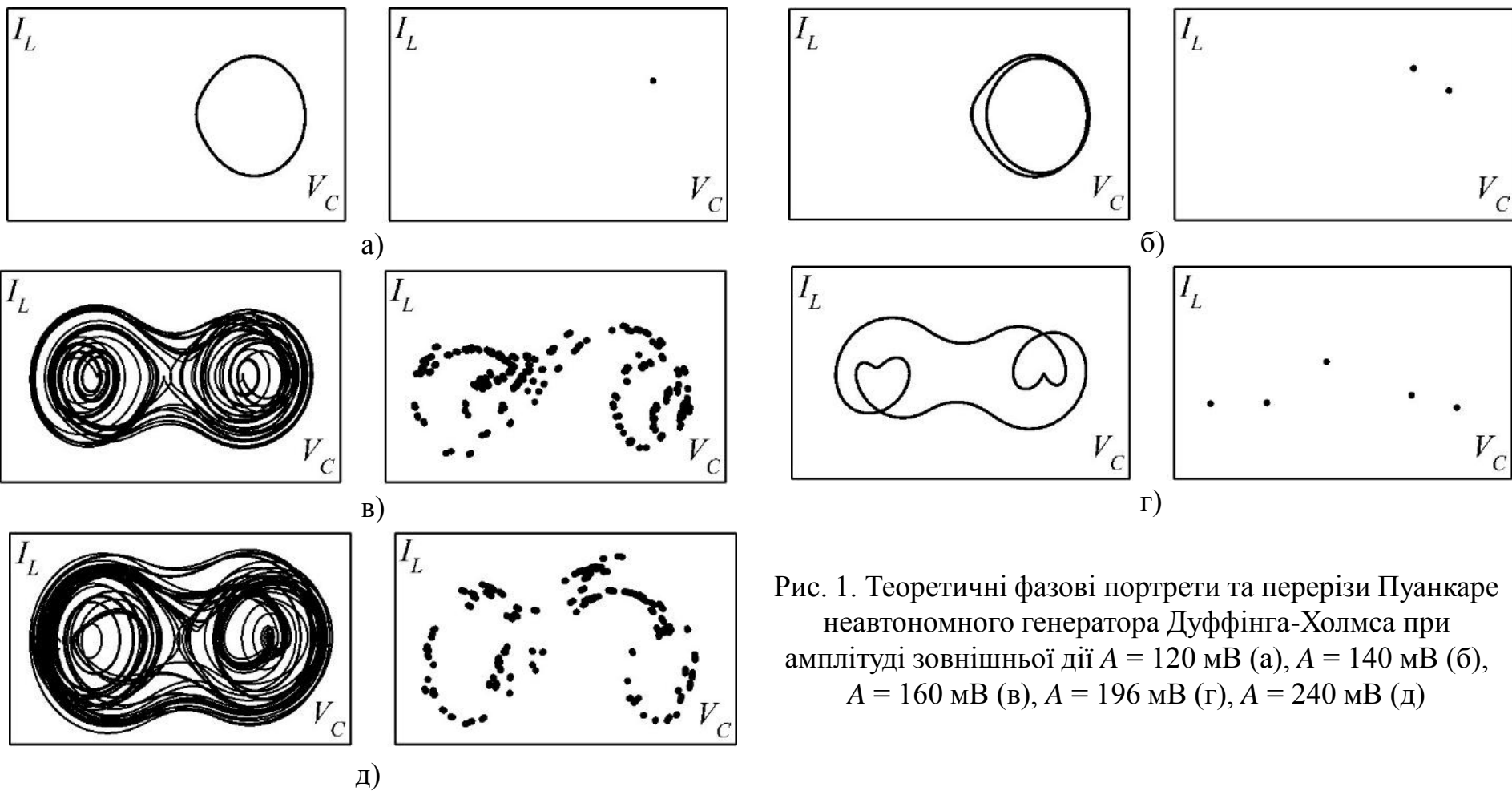


Рис. 1. Теоретичні фазові портрети та перерізи Пуанкаре неавтономного генератора Дуффінга-Холмса при амплітуді зовнішньої дії $A = 120$ мВ (а), $A = 140$ мВ (б), $A = 160$ мВ (в), $A = 196$ мВ (г), $A = 240$ мВ (д)

Результати експериментального дослідження перерізу Пуанкаре фазових потретів неавтономного генератора Дуффінга-Холмса

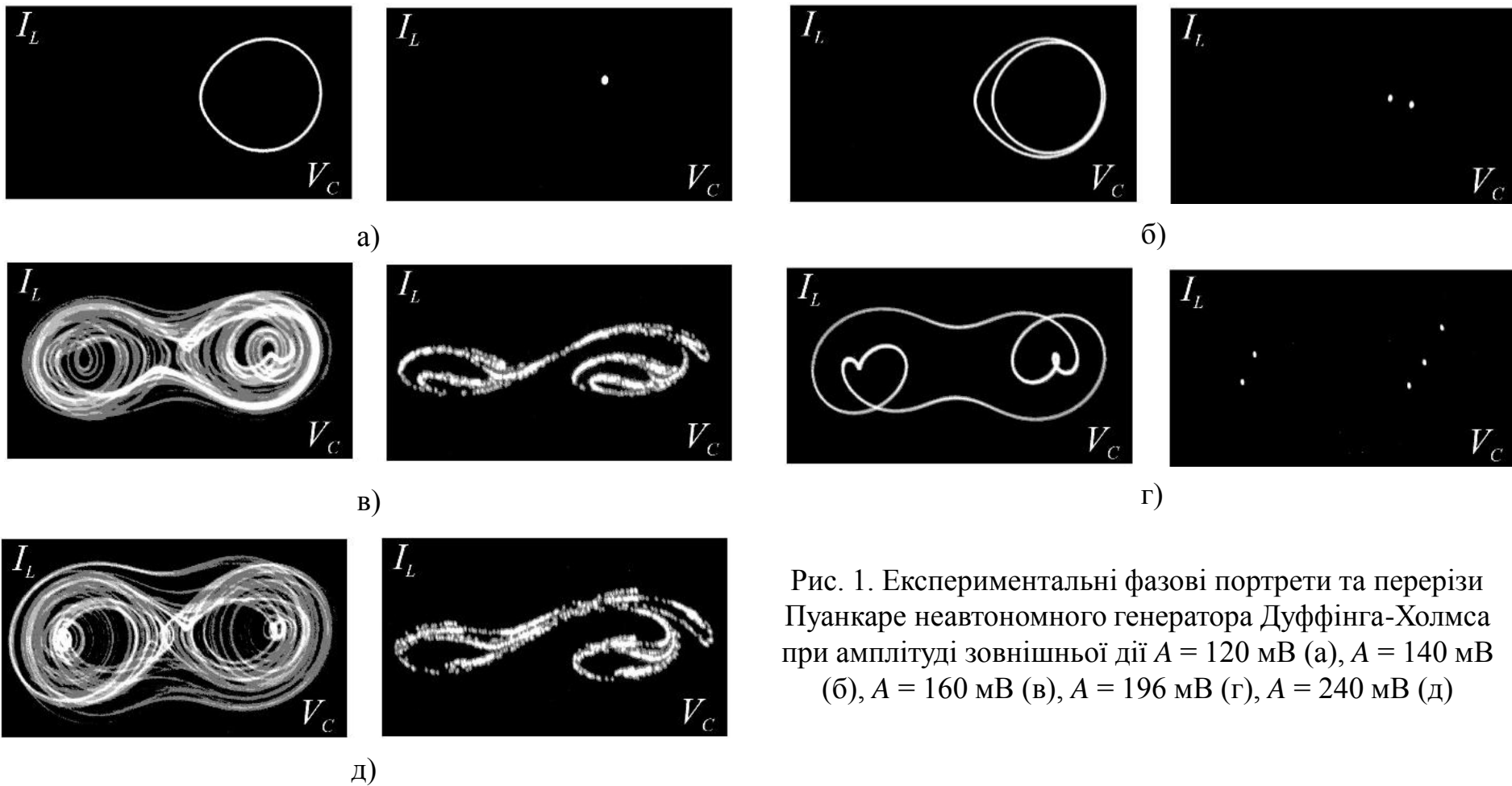
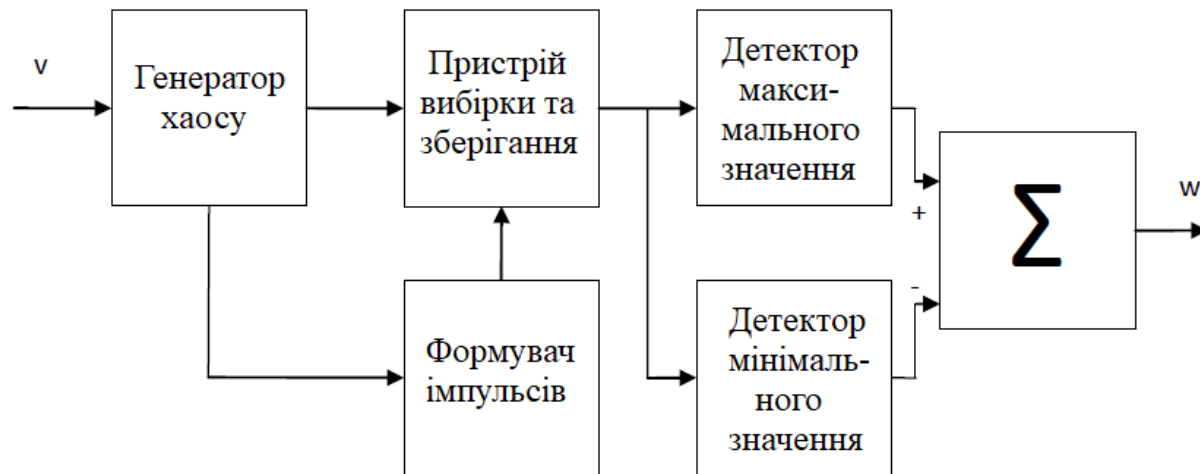


Рис. 1. Експериментальні фазові портрети та перерізи Пуанкаре неавтономного генератора Дуффінга-Холмса при амплітуді зовнішньої дії $A = 120$ мВ (а), $A = 140$ мВ (б), $A = 160$ мВ (в), $A = 196$ мВ (г), $A = 240$ мВ (д)

Структурна схема для отримання вимірювального сигналу від генератора детермінованого хаосу



Електрична схема синхронізації генератора Дуффінга-Холмса з управлінням у петлі зворотного зв'язку

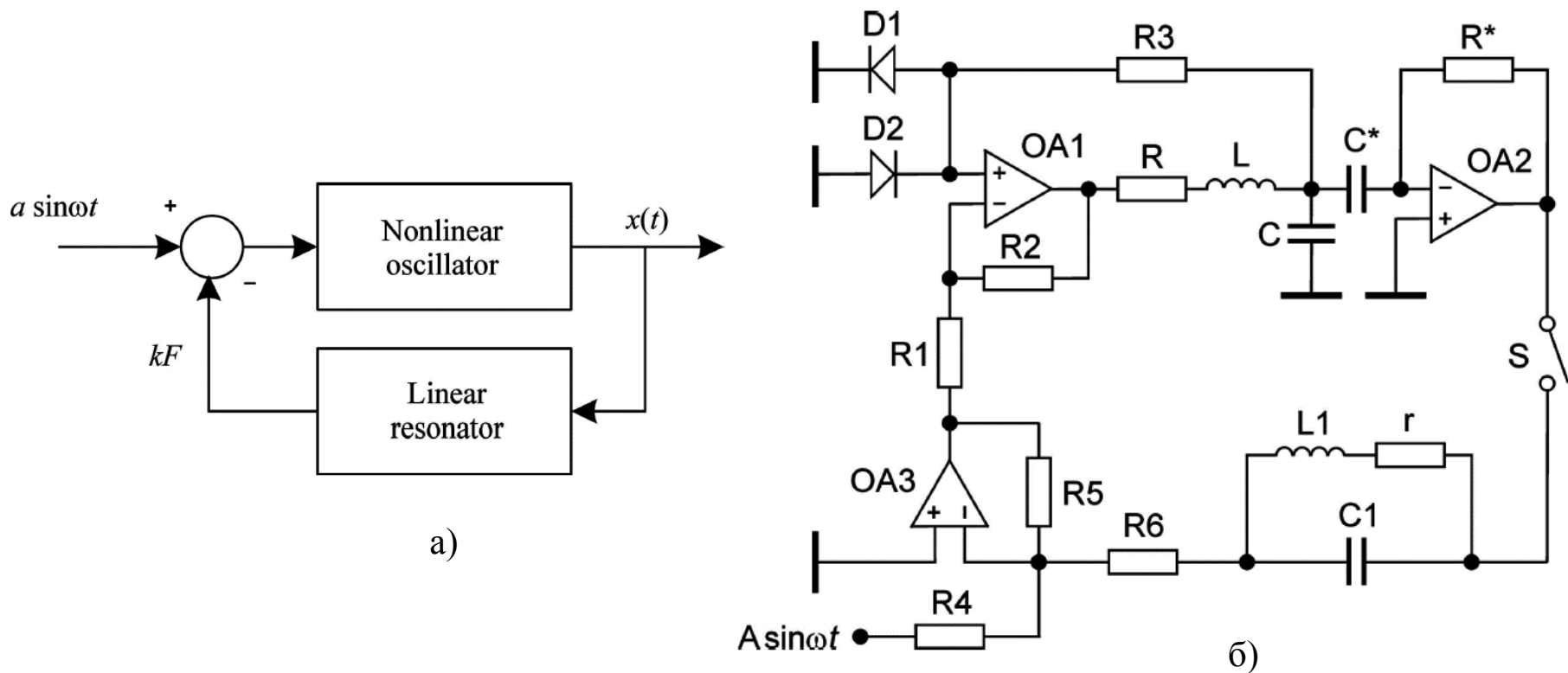


Рисунок 1 - Структурна схема пристрою управління (а) та електрична схема (б) синхронізації генератора Дуффінга-Холмса з управлінням у петлі зворотного зв'язку

Математична модель та числові результати синхронізації генератора Дуффінга-Холмса

Математична модель генератора з синхронізацією в нормованих змінних

$$\begin{aligned}\dot{x} &= y, \\ \dot{y} &= -by + x - x^3 + a \sin \omega t - k(y - y_1), \\ \dot{x}_1 &= \omega_1(y_1 - b_1 x_1), \\ \dot{y}_1 &= \omega_1[-x_1 + k_1(y - y_1)].\end{aligned}$$

Числові результати, отримані з системи рівнянь за допомогою програми моделювання Mathematica.

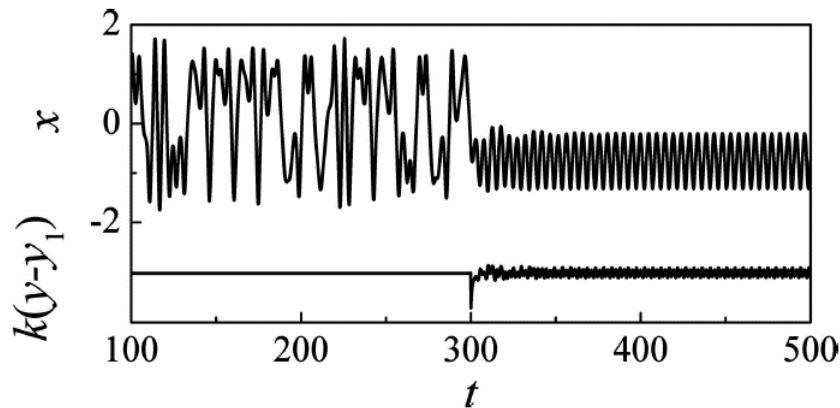
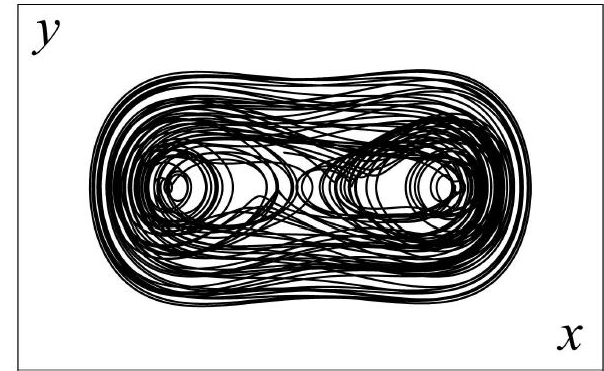
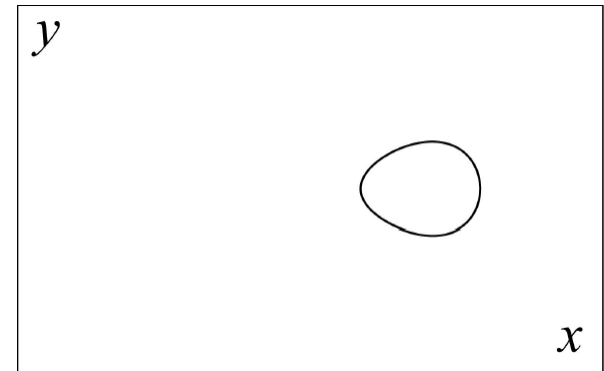


Рисунок 1 - Форми сигналу x з системи рівнянь



а)



б)

Рисунок 2 - Фазові портрети:
а) без контролю, б) з контролем

Експериментальні результати стабілізації в неавтономному хаотичному генераторі Дуффінга-Холмса

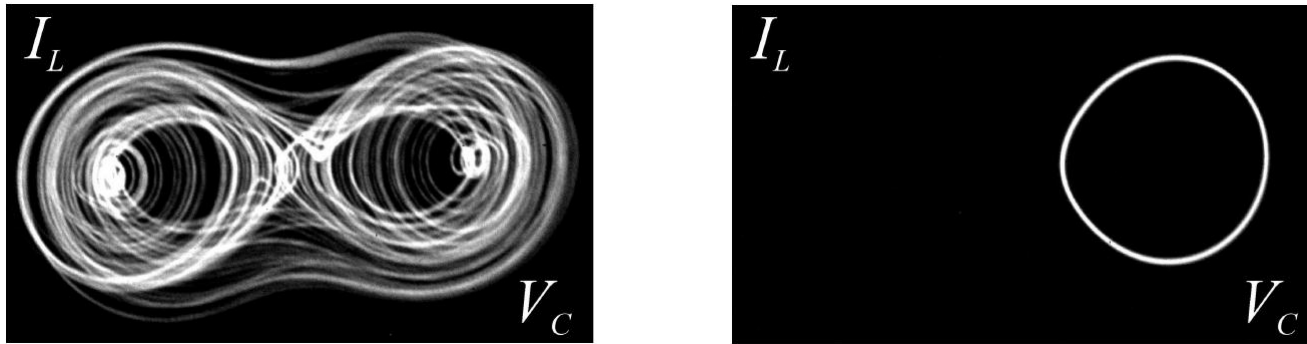


Рисунок 1 – Фото експериментальних фазових портретів до (а) та після (б) стабілізації

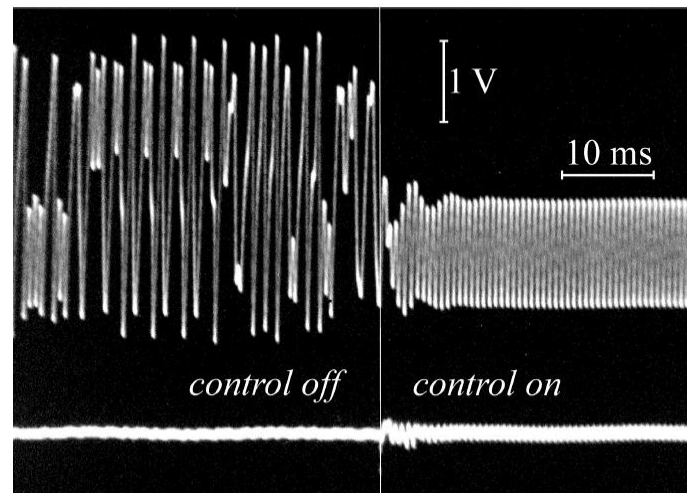


Рисунок 2 - Експериментальні сигнали до та після стабілізації

Електрична схема автономного генератора Дуффінга-Холмса на операційних підсилювачах

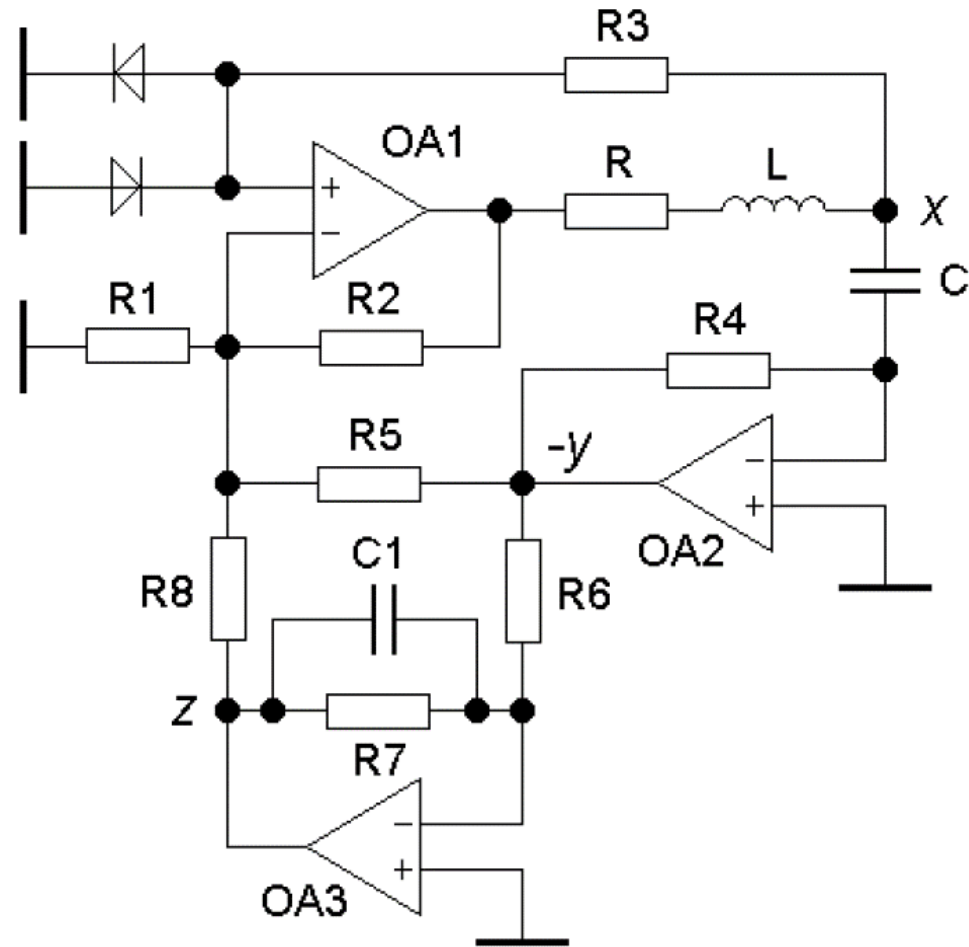


Рисунок 1 – Електрична схема автономного генератора Дуффінга-Холмса на операційних підсилювачах

Результати модельних досліджень автономного генератора Дуффінга-Холмса

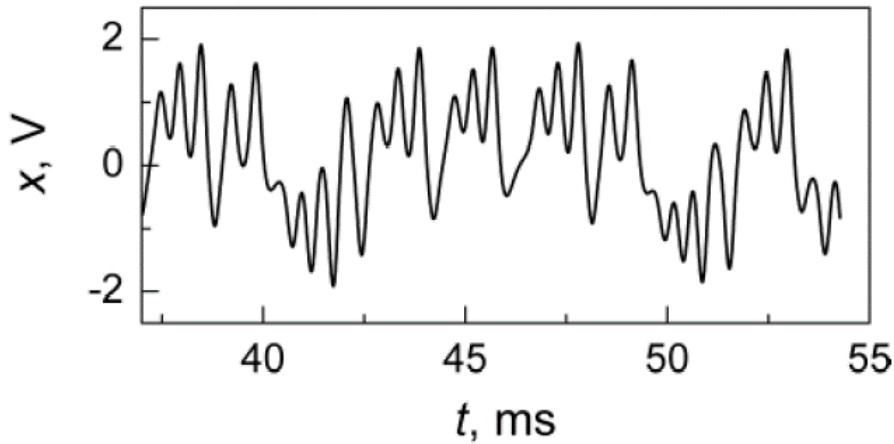
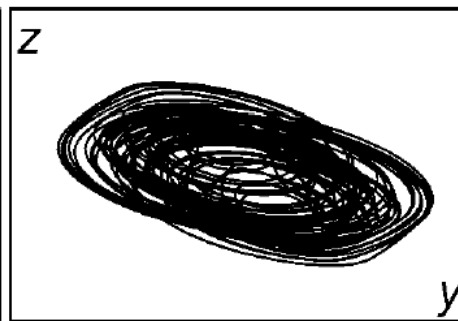
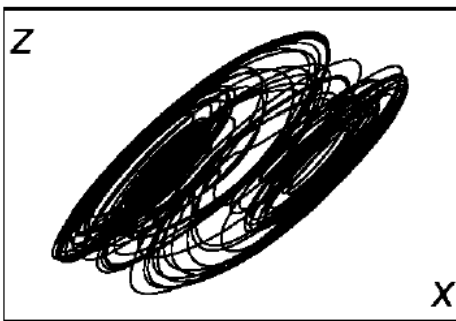
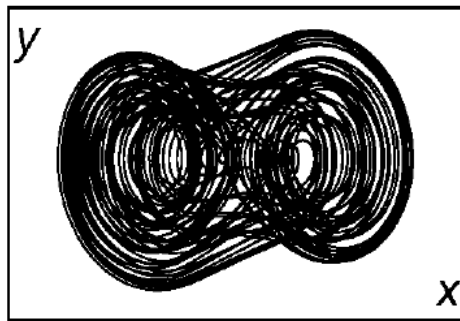


Рисунок 1 – Типова хаотична форма сигналу $x(t)$



$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= y, \\ \frac{dy}{dt} &= x - x^3 + by - kz, \\ \frac{dz}{dt} &= \omega_f (y - z). \end{aligned}$$

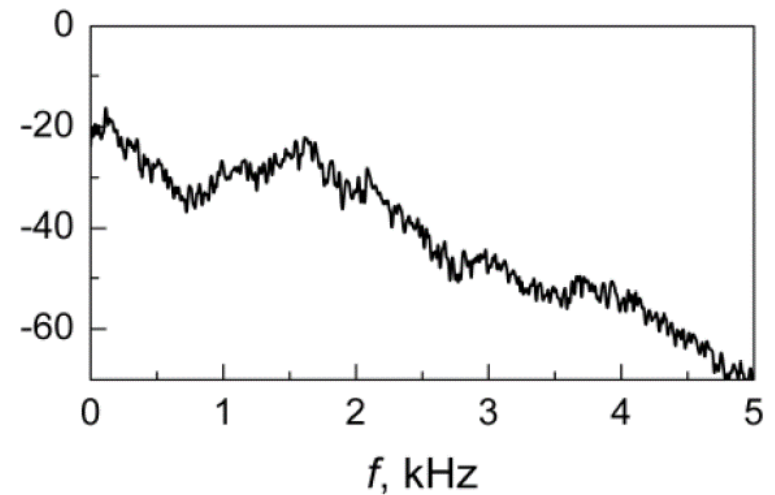


Рисунок 2 – Імітований спектр потужності S від змінної $x(t)$

Рисунок 3 – Імітація фазових портретів у площинах $[x-y]$, $[x-z]$, $[y-z]$ ¹⁶

Комп'ютерна схемотехнічна модель неавтономного генератора Дуффінга-Холмса

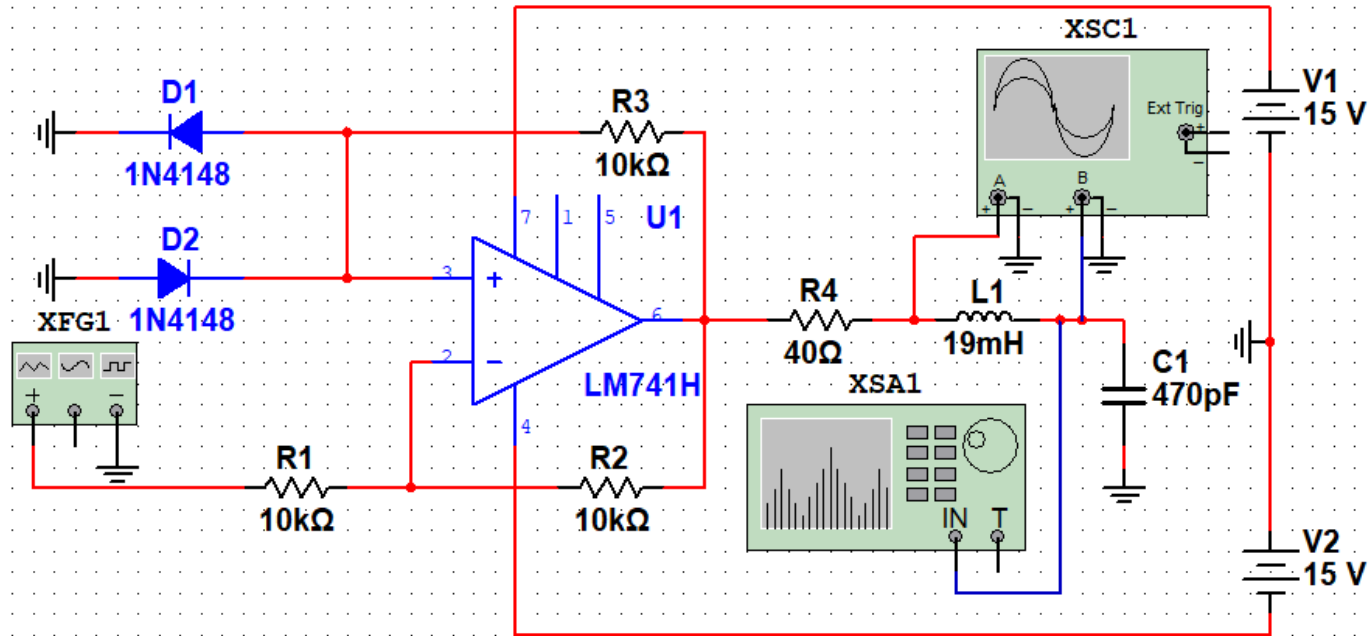
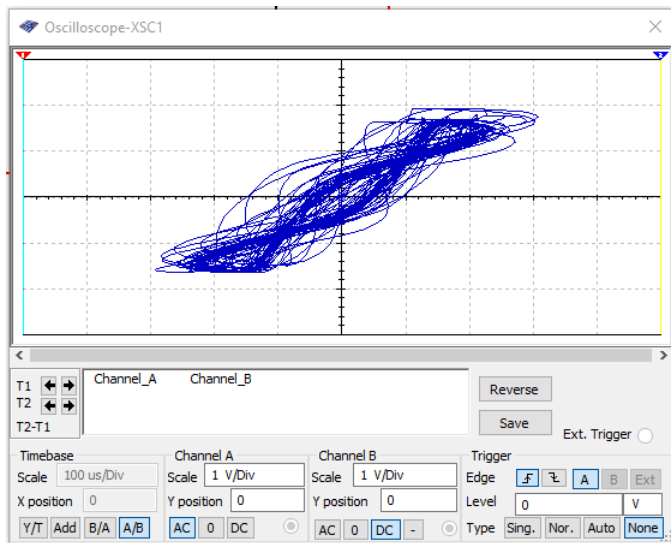
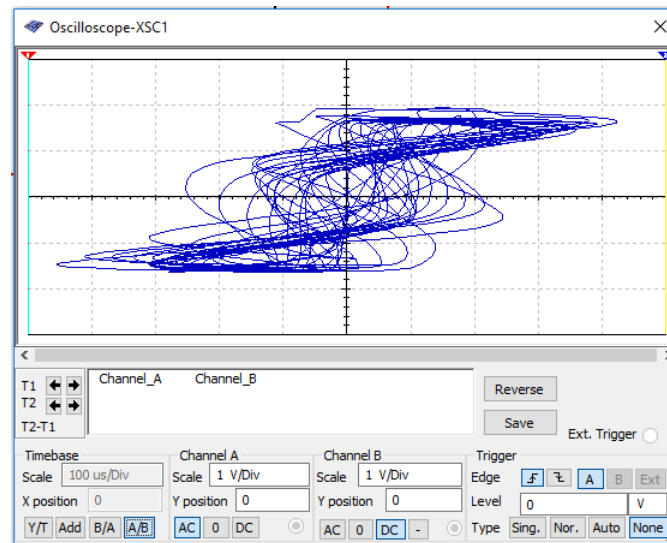


Рисунок 1 - Комп'ютерна схемотехнічна модель неавтономного генератора Дуффінга-Холмса в програмі Multisim 10.1 з підключеним вимірювальним обладнанням

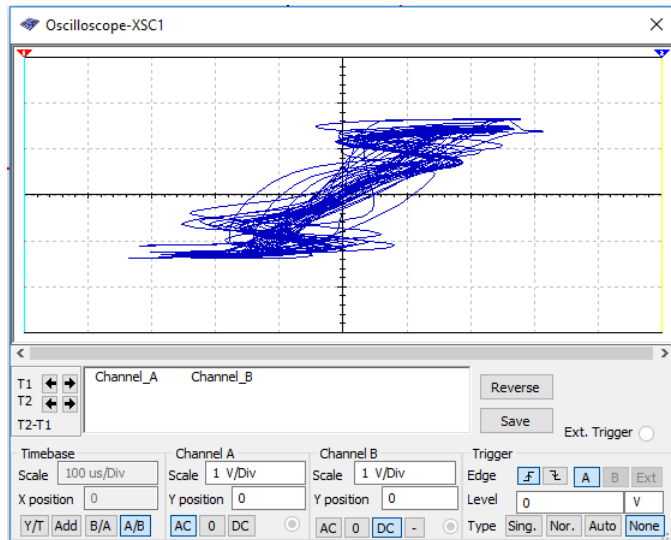
Результати комп'ютерного моделювання фазових портретів неавтономного генератора Дуффінга-Холмса



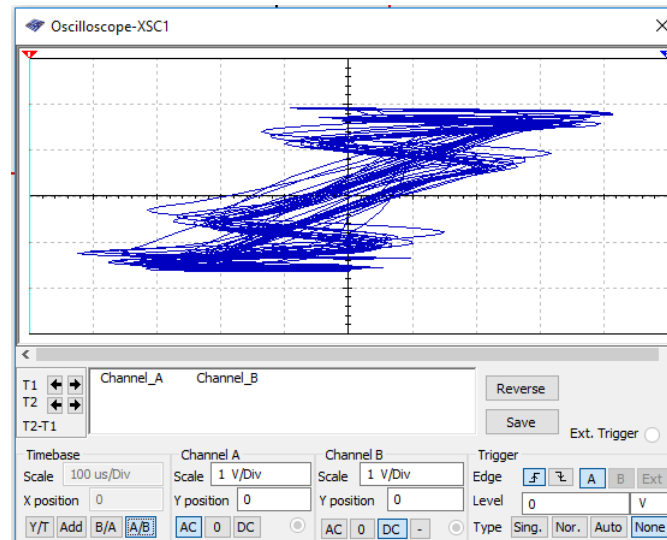
а)



б)



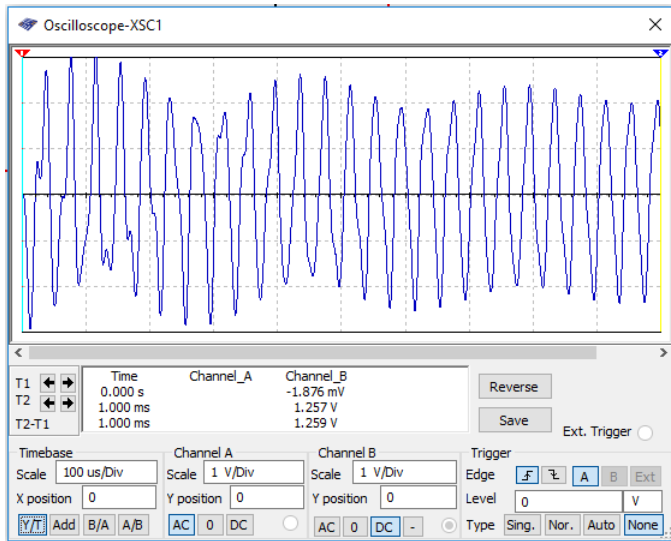
в)



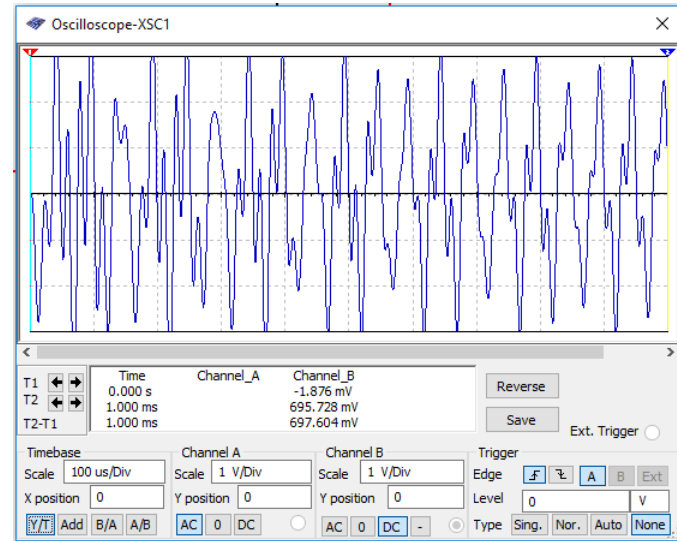
г)

Рисунок 1 – Фазові портрети генератору в площині генерованих напруг U_C та $U_L + U_C$ при $U_{BX} = 360$ мВ та $f = 25$ кГц (а), $f = 20$ кГц (а), $f = 15$ кГц (в), $f = 10$ кГц (г)

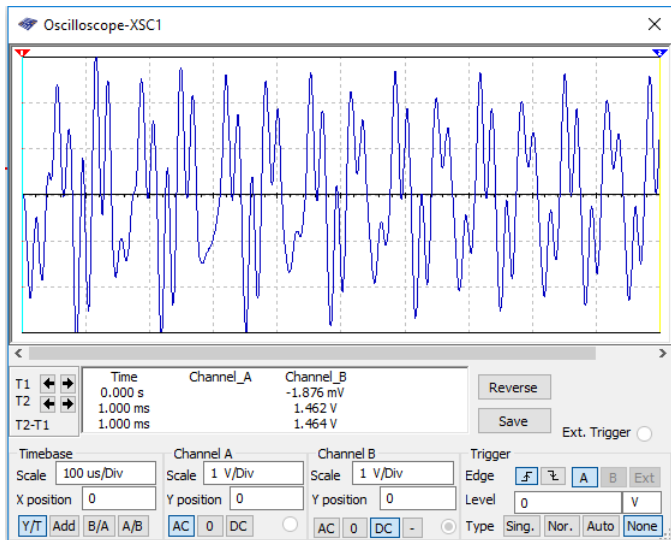
Результати комп'ютерного моделювання часових діаграм напруги неавтономного генератора Дуффінга-Холмса



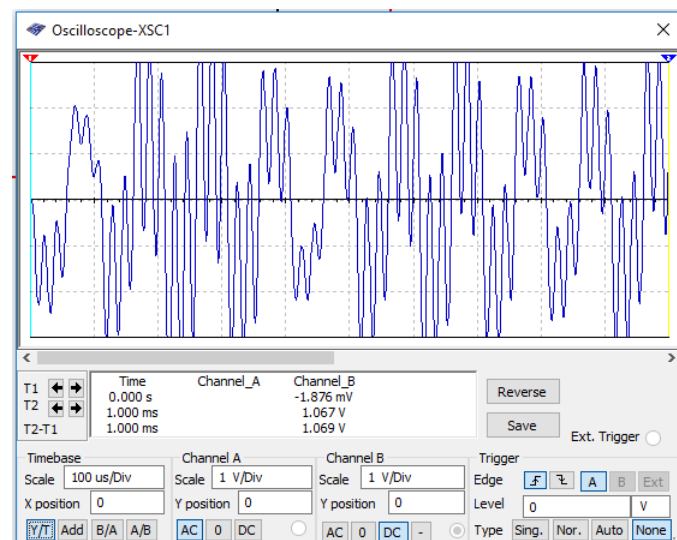
a)



б)



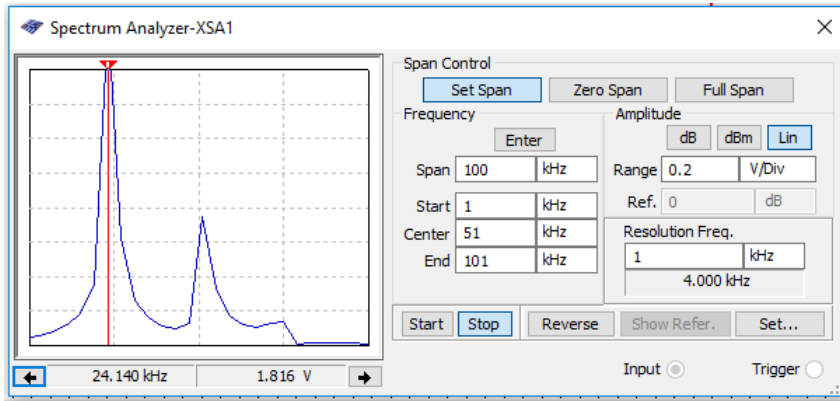
в)



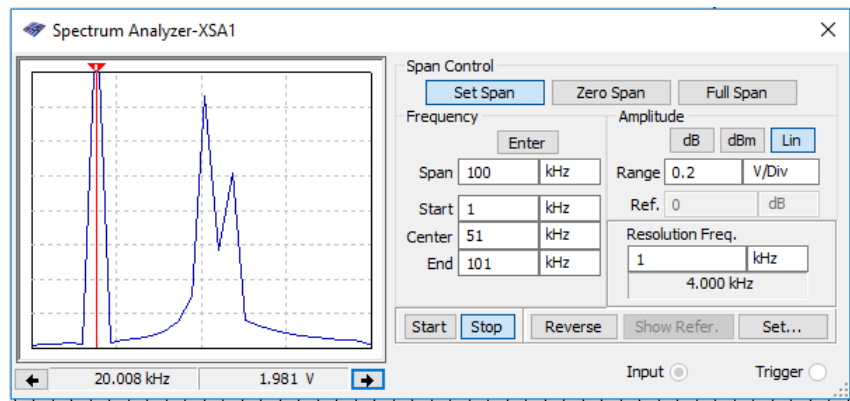
г)

Рисунок 1 – Осцилограми генерованої напруги U_C при $U_{BX} = 360$ мВ
та $f = 25$ кГц (а), $f = 20$ кГц (а), $f = 15$ кГц (в), $f = 10$ кГц (г)

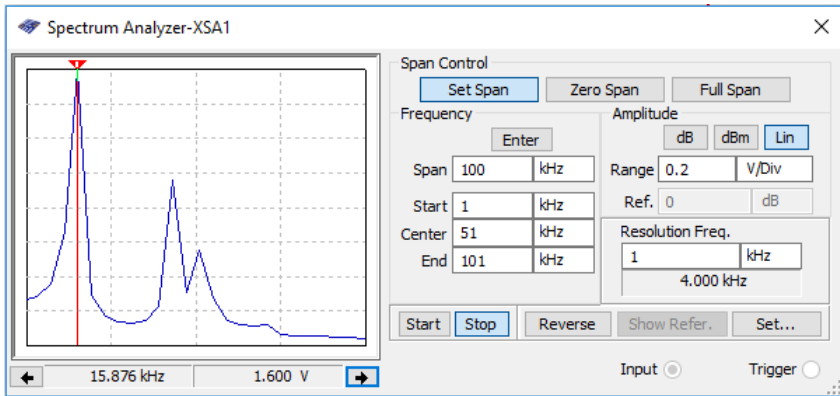
Результати комп'ютерного моделювання АЧС неавтономного генератора Дуффінга-Холмса



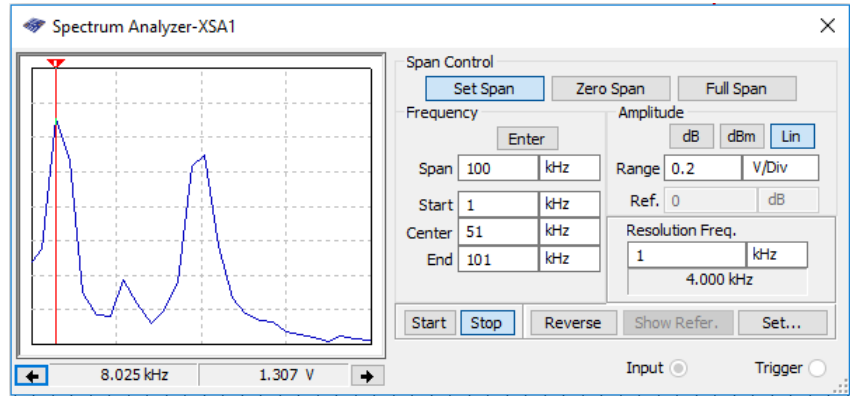
а)



б)



в)



г)

Рисунок 1 – Амплітудо-частотні характеристики генерованої напруги U_C при $U_{BX} = 360$ мВ та $f = 25$ кГц (а), $f = 20$ кГц (б), $f = 15$ кГц (в), $f = 10$ кГц (г)

ВИСНОВКИ

У роботі наведено результати аналізу стану радіовимірювальних перетворювачів електричних величин на основі генераторів детермінованого хаосу. Обґрунтовано застосування перерізу Пуанкаре для визначення інформації про вимірювану величину. Наведено структурну схему для отримання вимірювального сигналу від генератора детермінованого хаосу. Розглянуто схемні варіанти генераторів Дуффінга-Холмса на основі операційних підсилювачів та розглянуто динамічні процеси електричних коливань у періодичному та хаотичному режимах.

Спроековано та досліджено електричну схему, яку можна розглядати як електричний аналог математичної автоколивальної системи типу Дуффінга-Холмса. Схема надзвичайно проста, легка в побудові та експлуатації. Тим не менш, вона демонструє типовий характер поведінки хаотичних систем, включаючи шлях подвоєння періоду до хаосу, вузькі вікна в непарних періодах у хаотичному режимі тощо. Показано, що багато базових якісних характеристик, таких як форма сигналу, фазові портрети та перерізи Пуанкаре можуть бути легко отримані в експерименті. Ці характеристики дуже добре узгоджуються з чисельно отриманими характеристиками з рівняння Дуффінга-Холмса. Це дозволяє зробити висновок, що динамічна поведінка систем типу Дуффінга-Холмса не чутлива до деталей непараболічного потенціалу. Також запропоновано структурну схему вимірювального обладнання з використанням радіовимірювальних перетворювачів електричних величин на основі генераторів детермінованого хаосу.

Наукова та практична новизна одержаних результатів

Наукова новизна одержаних результатів – отримав подальший розвиток застосування перерізу Пуанкаре фазових портретів автоколиваних систем неавтономних і автономних генераторів детермінованого хаосу типу Дуффінга-Хомлса для отримання вимірювальної інформації.

Практична новизна одержаних результатів – полягає в отриманих нових результатів теоретичних, експериментальних і модельних досліджень фазових портретів і перерізів Пуанкаре неавтономних і автономних генераторів детермінованого хаосу типу Дуффінга-Хомлса на операційних підсилювачах.

Доповідь завершена.

Дякую за увагу!