

**ЗАСТОСУВАННЯ ХАОТИЧНОГО СУПЕРРЕГЕНЕРАТОРА В ЗАДАЧАХ МОНІТОРИНГА
(Частина 1)**

USE CHAOTIC SUPERREGENERATOR IN PROBLEM OF THE MONITORING (PART 1)



Артеменко Владислав Андрійович, UT5UDJ, магістр екології, науковий співробітник відділу гідрохімії, Український гідрометеорологічний інститут Державної служби України з надзвичайних ситуацій та Національної академії наук України, м. Київ, Україна, e-mail: artemenko@uhmi.org.ua

<https://orcid.org/0000-0003-0536-5415>



Петрович Володимир Васильович, кандидат технічних наук, професор, старший науковий співробітник, професор кафедри транспортного будівництва та управління майном, Національний транспортний університет, м. Київ, Україна e-mail: petrovichvv60@ukr.net

<https://orcid.org/0000-0003-0422-2535>

Анотація. Вперше розглянуто новий вид суперрегенерації – хаотичну суперрегенерацію.

Пропонується у якості одного із автогенераторних методів моніторингу використовувати хаотичні суперрегенератори.

Запропонований хаотичний суперрегенератор побудований на базі хаотичного автогенератора, що працює в режимі переривчастих коливань.

На основі системи звичайних диференціальних рівнянь складена математична модель хаотичного суперрегенератора.

Розроблене відповідне програмне забезпечення для дослідження поведінки моделі хаотичного суперрегенератора на мовах програмування MATLAB, FORTRAN та PASCAL. Особливо зазначено, що модель суперрегенератора повинна значно підсилювати слабкий сигнал, який приймається.

У цьому зв'язку вперше була продемонстрована можливість підсилення слабого вхідного сигналу за допомогою хаотичного суперрегенератора.

Розглянута одна із можливих реалізацій хаотичного суперрегенератора із зовнішнім гасінням. Враховуючи на те, що статичні зображення не дозволяють адекватно аналізувати роботу суперрегенератора, а у ряді випадків навіть не дають змоги ідентифікувати наявність явища суперрегенерації взагалі, при моделюванні роботи різних типів суперрегенераторів запропоновано

використовувати анімацію. Із цією метою розроблене спеціальне програмне забезпечення на мовах FORTRAN та PASCAL, із використанням OPENGL та GLUT.

Приведений фрагмент програми, яка моделює роботу хаотичного суперрегенератора на мові MATLAB.

Запропонована універсальна методика ідентифікації суперрегенеративного режиму, яка може бути використана при дослідженнях суперрегенераторів будь-яких типів.

Мета роботи. 1. Виконати дослідження явища хаотичної суперрегенерації, яке відкрите авторами статті, на прикладі роботи хаотичного суперрегенеративного приймача із зовнішнім гасінням.

2. Розробити програмне забезпечення для потреб досліджень різних типів суперрегенераторів із використанням анімації.

3. Запропонувати універсальну методику ідентифікації суперрегенеративного режиму для різних типів обладнання, що реалізують суперрегенеративний режим.

Ключові слова: хаотична суперрегенерація, хаотичний автогенератор, що працює у переривчастому режимі, хаотичний суперрегенератор із зовнішнім гасінням, анімація роботи моделі на основі OPENGL та GLUT, універсальна методика ідентифікації суперрегенеративного режиму.

*Немає нічого більш могутнього, ніж ідея,
час якої прийшов*

В. Гюго

Вступ

Як відомо, існує багато методів оцінки стану природних об'єктів. При цьому особливу актуальність набувають безконтактні методи, які дозволяють проводити експрес-дослідження при мінімальному впливі на такі об'єкти. Ці методи переважно базуються на дії електромагнітного випромінювання достатньо слабкої інтенсивності, із приборною фіксацією відклику. При реалізації цих методів використовують, по-суті, синусоїдальний (монохроматичний) вплив на об'єкти, або, у іншому випадку, частота впливу змінюється з часом для фіксації даних відклику у певному спектрі частот.

Сигнал відклику може сприйматись як спеціальним окремим детектором, так і самим генератором. Якщо сигнал відклику у системі безпосередньо взаємодіє із генератором, маємо автогенераторний метод вимірювання [1].

Розробка принципово нових автогенераторних методів дослідження природних об'єктів являє собою актуальну практичну задачу.

Один із таких ефективних методів дослідження є використання у вимірювальних приладах суперрегенераторів (superregenerators).

Ще у 1922 році Е. Армстронг (E. Armstrong) відкрив принцип суперрегенерації та розробив основи суперрегенеративного прийому []^{*}

^{*}Про цього видатного вченого, його численні відкриття та трагічну долю можна знайти інформацію в ІНТЕРНЕТ'і, а також у невеликій статті в журналі "Радіоаматор" (Київ) за 1999 рік, №8, с.15.

Як свого часу писав сам Армстронг, суперрегенеративний приймач не є простим усуненням недоліків приймача регенеративного. Такий приймач володіє принципово новими якостями, головне із яких – значне число режимів його роботи. Завдяки можливості приймати сигнали із різними видами модуляції ця якість робить його унікальним серед радіоприймачів інших типів.

Свого часу широкі дослідження по проблемам суперрегенерації проводив у Київському політехнічному інституті (КПІ) М.К.Белкін.

Але із впевненістю можливо стверджувати, що більшість режимів роботи суперрегенераторів залишаються не дослідженими.

Відкриття детерміновано-хаотичних коливань у системах різної природи стало визначним науковим явищем другої половини ХХ-го сторіччя.

З'явилась концепція детермінованого хаосу.

Слід окремо зазначити, що прояви детермінованого хаосу у суперрегенераторі сам Армстронг описав ще у 1922 році.

Нині у багатьох лабораторіях проводять масштабні дослідження по створенню вимірювальних приладів на основі хаотичних генераторів. Такі генератори виробляють коливання із безперервним спектром у достатньо широкій смузі частот.

Деякі із схем суперрегенераторів та хаотичних генераторів конструкції *UT5UDJ* приведені в ІНТЕРНЕТ'і.

Авторами статті вперше розроблена схема та побудована математична модель хаотичного суперрегенератора (із переривчастою генерацією та переключенням режимів).

В роботі пропонується принципово нова концепція – суперрегенеративний приймач на базі генератора хаотичних коливань. Математичне моделювання такої конструкції виконувалось переважно на мові програмування *MATLAB*. В статті також розглянуті можливості практичної реалізації схеми хаотичного суперрегенератора.

Переривчаста генерація та суперрегенерація

Суперрегенератори звичайно будують на основі генераторів періодичних коливань. Найбільш часто при цьому використовують генератори синусоїдальних коливань на базі *LC*-генераторів певного типу. Також зустрічаються схеми із використанням *RC*-генераторів прямокутних коливань.

Далі генератор переводять в режим переривчастих коливань за рахунок, наприклад, використання змінної напруги живлення, або за рахунок самого генератора.

Під впливом вхідного сигналу, який приймається, генератор у режимі переривчастої генерації буде “запускатися” трохи раніше, ніж у випадку відсутності такого сигналу. В результаті амплітуда коливань генератора встигає досягнути більшої величини у порівнянні із випадком відсутності вхідного сигналу (тобто перш ніж відбудеться процес “гасіння” коливань самого генератора).

Для реальних конструкцій амплітуда вхідного сигналу може складати частку мікрвольт ... одиниць мікрвольт (мінімальні значення сигналів).

При цьому амплітуда коливань генератора (перш ніж відбудеться гасіння коливань) може сягнути величини одиниць або навіть десятків вольт для транзисторних схем та, відповідно, декількох сотень вольт для схем лампових.

Виникає підсилення вхідного сигналу по напрузі до мільйона разів. Для реальних конструкцій підсилення по напрузі одержують у межах 10 000 ... 100 000 разів ($80dB_u$... $100dB_u$).

Слід відмітити, що переривання роботи генератора при цьому також відбувається по періодичному закону (найбільш часто по синусоїдальному або прямокутному).

Схеми із перериванням коливань засобами самого генератора працюють складніше. У цьому разі може змінюватись частота переривань генерації (частота гасіння), але у загальному випадку процес переривання залишається також періодичним.

Для того, щоб генератор в режимі переривчастих коливань вважався суперрегенератором, необхідно, крім всього іншого, дотримуватись додаткових умов [3].

Однак явища переривчастої генерації та суперрегенерації, по-суті, явища різні.

Для виникнення суперрегенерації необхідно в першу чергу здійснити переривчасту генерацію, але, в той же час, не всякий генератор, що працює в режимі переривчастої генерації, може бути суперрегенератором.

У відповідній літературі часто зустрічаються фотографії осцилограм, які нібито демонструють “суперрегенеративний режим” роботи схем. Однак такі осцилограми будуть спостерігатись і в режимі переривчастої генерації, навіть при відсутності суперрегенерації!

Те саме має місце при моделюванні роботи схем у EWB, MICRO-CAP та інших аналогічних системах схематичного моделювання. По осцилограмі завжди можливо розпізнати, – чи працює генератор у переривчастому режимі. Однак значно важче визначити, реалізується при цьому суперрегенеративний режим, або ні.

При математичному моделюванні також важче розпізнати роботу схеми у суперрегенеративному режимі, ніж у випадку використання реальних конструкцій.

Суперрегенератор обов’язково повинен підсилювати слабкий сигнал якщо не в мільйон, то, у крайньому разі, у тисячу разів.

Це і буде критерієм наявності суперрегенерації, який застосовується як для перевірки роботи реальних конструкцій, так і перевірки працездатності моделей.

На початку дослідження перш за все виникає питання – “чим це перевіряти”?

Найбільш просто таку перевірку здійснювати за допомогою синусоїдального сигналу із частотою, яка дорівнює власній частоті генератора (частоті власних коливань LC – контура).

Для цього проводять певну кількість числових експериментів. Поступово, при переході від одного експеримента до наступного, змінюють амплітуду, наприклад, на порядок, починаючи від ($1E - 16$) і закінчуючи ($1E - 4$).

Далі виникає наступне питання – “як перевіряти”?

З цією метою спостерігають за амплітудами спалахів при суперрегенерації, тобто як змінюються амплітуди при кожному експерименті.

При лінійному режимі роботи амплітуди спалахів суперрегенератора будуть істотним чином залежати від амплітуди сигналів, які приймаються [2, 3].

Це, очевидно, достатньо легко зафіксувати. Найбільш складно фіксувати відклик на величину вхідного сигналу при нелінійному (логарифмічному) режимі роботи супергенератора, коли змінюється площа (заповнення) імпульсів спалахів. Адекватним методом фіксації відклику у цьому випадку може бути застосування анімації (див.нижче).

Постановка проблеми

Як відомо, автогенератори є істотно нелінійними системами. Достатньо мати, як мінімум, три реактивних елементи (L та/або C), як з'являється можливість виникнення детермінованого хаосу у схемі.

Числові експерименти розпочинали із аналізу роботи класичного хаотичного генератора Лео Чуа [4-6], який надалі був переведений у передстартовий режим.

У схемі (рис. 1) $C\emptyset 1, C\emptyset 2, L\emptyset 1$ та $R\emptyset 1$ – величини відповідних елементів (в фарадах, генрі, омах).

Елемент N – єдине джерело живлення, всі інші елементи схеми – пасивні.

Параметричний резистивний елемент $RL\emptyset 1$ у реальній конструкції реалізується на основі польового транзистора (опір, який керується зовнішньою напругою).

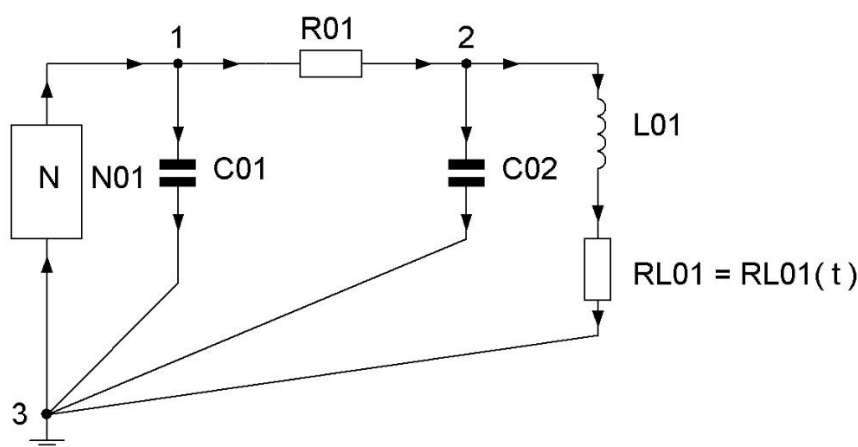


Рисунок 1 – Схема хаотичного суперрегенератора.

Figure 1 – The scheme of chaotic superregenerator.

Змінюючи періодично опір втрат $RL\emptyset 1$, далі “стартували” генератор, досягаючи тим самим режиму “переривчастої” генерації.

В результаті вперше одержано суперрегенеративне підсилення слабкого сигнала у схемі хаотичного генератора.

Спеціально відмітимо, що схема класичного хаотичного генератора Лео Чуа, та наведена на рис. 1, зовнішньо схожі. Однак, незважаючи на нібито незначні відмінності, ці схеми ведуть себе кардинально по-різному. Якщо в роботах Лео Чуа та його послідовників хаотичні генератори розглядалися як працюючі у неперервному режимі, з позицій впливу різних параметрів на схему та явища синхронізації, мета авторів статті була інша – досягнення та подальше дослідження суперрегенеративного режиму у конструкціях хаотичних генераторів.

Це зайвий раз ілюструє положення про те, що навіть незначна зміна конструкції хаотичного генератора може привести до відкриття нових ефектів у роботі схеми.

Попередньо були визначені параметри, при яких спостерігався хаотичний режим роботи схеми (із аттрактором вида DS [4, 6]):

$$C\emptyset 1 = 1/9, C\emptyset 2 = 1, L\emptyset 1 = 1/7, R\emptyset 1 = 10/7.$$

В процесі моделювання величина $RL\emptyset 1$ постійно змінювалась самою програмою (див. нижче).

Система диференціальних рівнянь схеми

Далі склали систему звичайних диференціальних рівнянь, яка описує роботу схеми (див. рис. 1). При цьому були використані більш реалістичні напрямки струмів у порівнянні із роботами Лео Чуа та врахована уточнена трактовка такого елемента схеми, як негatron (див. також нижче).

Напруга на конденсаторах та струм через індуктивність (у вольтах, амперах) позначені як $UC\emptyset 1$, $UC\emptyset 2$ та $IL\emptyset 1$.

ЕДС негatronа EN (не напруга!) дорівнює падінню напруги на конденсаторі $C\emptyset 1$, тобто $UC\emptyset 1$.

Для контура $N/C\emptyset 1$ маємо

$$EN_{\text{ЕДС}} = UC\emptyset 1 \quad (1)$$

Враховуючи протилежність знаків для ЕДС та напруги, запишемо вираз (1) у вигляді

$$UN = -UC\emptyset 1 \quad (2)$$

Позначимо IN як струм через негatron (струм негatronа), який є функцією напруги на негatronі. У цьому разі

$$IN(UN) = \psi(-UC\emptyset 1) \quad (3)$$

Для контура $C\emptyset 1/R\emptyset 1/C\emptyset 2$ маємо:

$$-UC\emptyset 1 + UR\emptyset 1 + UC\emptyset 2 = \emptyset, \quad (4)$$

а далі

$$UR\emptyset 1 = UC\emptyset 1 - UC\emptyset 2. \quad (5)$$

Виходячи із виразу (5), одержуємо:

$$IR\emptyset 1 = \frac{UR\emptyset 1}{R\emptyset 1} = \frac{(UC\emptyset 1 - UC\emptyset 2)}{R\emptyset 1}. \quad (6)$$

Для вузла 1 маємо:

$$IN(-UC\emptyset 1) - IC\emptyset 1 - IR\emptyset 1 = \emptyset. \quad (7)$$

Враховуючи (6), далі одержуємо:

$$IC\emptyset 1 = IN(-UC\emptyset 1) - IR\emptyset 1 = IN(-UC\emptyset 1) - \frac{(UC\emptyset 1 - UC\emptyset 2)}{R\emptyset 1}. \quad (8)$$

В результаті

$$C\emptyset 1 \cdot \frac{dUC\emptyset 1}{dt} = -\frac{(UC\emptyset 1 - UC\emptyset 2)}{R\emptyset 1} + IN(-UC\emptyset 1). \quad (9)$$

Для вузла 2 маємо:

$$IR\emptyset 1 - IC\emptyset 2 - IL\emptyset 1 = \emptyset. \quad (10)$$

Використовуючи вираз (6), одержуємо:

$$IC\phi 2 = IR\phi 1 - IL\phi 1 = \frac{(UC\phi 1 - UC\phi 2)}{R\phi 1} - IL\phi 1. \quad (11)$$

В результаті

$$C\phi 2 \cdot \frac{dUC\phi 2}{dt} = \frac{(UC\phi 1 - UC\phi 2)}{R\phi 1} - IL\phi 1. \quad (12)$$

Для контура $C\phi 2/RL\phi 1/L\phi 1$:

$$-UC\phi 2 + URL\phi 1 + UL\phi 1 = \phi, \quad (13)$$

і далі

$$UL\phi 1 = UC\phi 2 - URL\phi 1 = UC\phi 2 - URL\phi 1 \cdot IL\phi 1. \quad (14)$$

Таким чином, остаточно:

$$L\phi 1 \cdot \frac{dIL\phi 1}{dt} = UC\phi 2 - RL\phi 1 \cdot IL\phi 1. \quad (15)$$

Систему диференціальних рівнянь виду (9), (12) та (15) легко вирішити числовим методом. При цьому, звісно, необхідно мати вольт-амперну характеристику негatrona, яку розглянемо далі.

Особливості вольт-амперної характеристики (ВАХ) негatrona

Звичайно при дослідженнях систем диференціальних рівнянь характеристику негatrona N апроксимують класичною кусочно-лінійною функцією виду

$$Y = \psi(x) = B \cdot x + (A - B) \cdot (ABS(x + BP) - ABS(x - BP))/2 \quad (16)$$

із параметрами:

$$A = -8/10,$$

$$B = -5/10,$$

$$BP = +1.$$

При моделюванні дуже важливим є той факт, що при кусочно-лінійній апроксимації ВАХ для деякої множини параметрів вирішення системи диференціальних рівнянь може сягнути “у нескінченність”.

У цьому зв'язку авторами була використана також “гладка” апроксимація згідно

$$Y = \psi(x) = K\phi 1 \cdot x + K\phi 2 \cdot ATAN(K\phi 3 \cdot x) \quad (17)$$

при наступних параметрах:

$$K\phi 1 = -4.77\phi\phi E - \phi\phi 1,$$

$$K\phi 2 = -2.7825E - \phi\phi 1,$$

$$K\phi 3 = +1.5715E + \phi\phi\phi.$$

Значення коефіцієнтів $K\phi 1$, $K\phi 2$ та $K\phi 3$ для (17) без особливих складностей знаходимо при вирішенні задачі нелінійної оптимізації (мінімізації) числовим методом, виходячи із даних, що були отримані при застосуванні виразу (16).

Хід кривих (16) та (17) виявився дуже близьким, тому потрібно було дати значне збільшення, щоб побачити різницю у ході цих кривих.

При цьому ВАХ типів (16) та (17) дають практично однаковий вид хаотичних аттракторів.

Характеристики негatrona (діод Лео Чуа) представлені на рис. 2а,б згідно виразів (16) та (17).

Як видно, “гладка” апроксимація (17) усуває первісний злом, що одержаний при застосуванні виразу (16).

Зрозуміло, що при збільшенні напруги значення струму негatrona буде зростати без обмежень.

Але слід пам’ятати, що головна мета дослідження на цьому етапі – показати можливості роботи хаотичного генератора у суперрегенеративному режимі, не загострюючи увагу на певних “шорсткістях” при розробці моделі.

Передстартовий режим роботи хаотичного суперрегенератора

З метою одержання у подальшому режиму переривчастої генерації слід перш за все підібрати у моделі такі значення елементів, коли коливання у системі будуть відсутні (передстартовий режим роботи).

При моделюванні змінювали таку величину, як α -співвідношення ємностей $C\emptyset 1$ і $C\emptyset 2$.

У дослідженні приймали значення α від 9 до 12, з кроком 0,1. Величина $C\emptyset 2$ при цьому залишалась незмінною, а значення $C\emptyset 1$ розраховували через відповідне значення α , тобто $C\emptyset 1 = C\emptyset 2 / \alpha$.

При цьому величину $RL\emptyset 1$ періодично змінювала сама програма у процесі інтегрування системи.

При незначній зміні параметрів передстартового режиму можуть з’являтися хаотичні коливання.

Так, при зменшенні величини $RL\emptyset 1$ виникають умови появи таких коливань.

Але при збільшенні значення $RL\emptyset 1$ такі умови зникають. Тобто, зміною значення $RL\emptyset 1$ при роботі програми досягаються умови появи хаотичних коливань, і які також можуть виникати періодично.

Як відомо, хаотичні коливання не характеризуються певною частотою, а мають неперервний спектр частот. Однак цілком можливо вибрати частоту вільних коливань у контурі $L\emptyset 1C\emptyset 2$ так, щоб всеж-таки досягнути деякої конкретної частоти коливань, та виконувати у подальшому необхідні розрахунки.

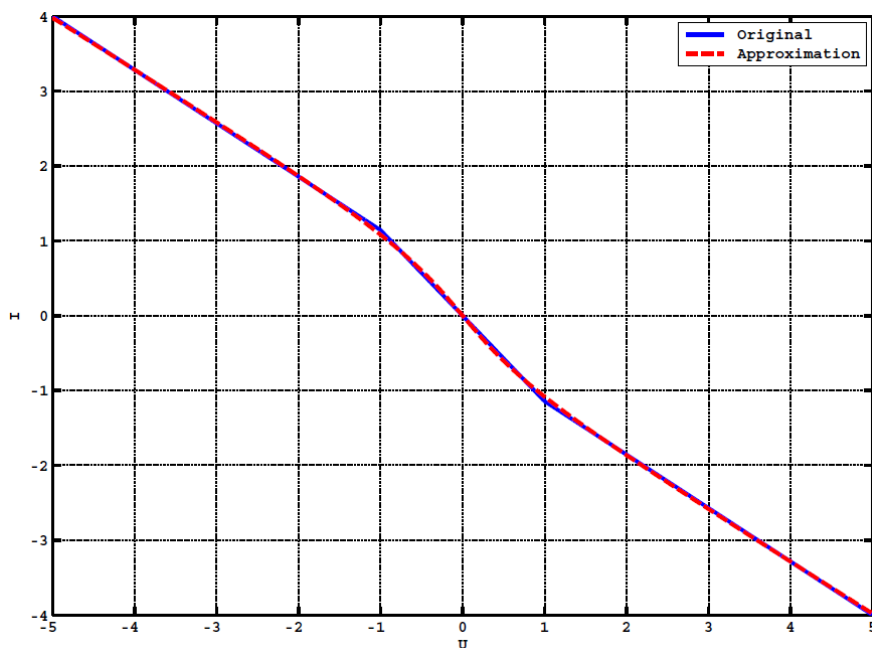
У відповідності із цим введемо колову частоту

$$\omega = 1/\text{SQRT}(L\emptyset 1 \cdot C\emptyset 2),$$

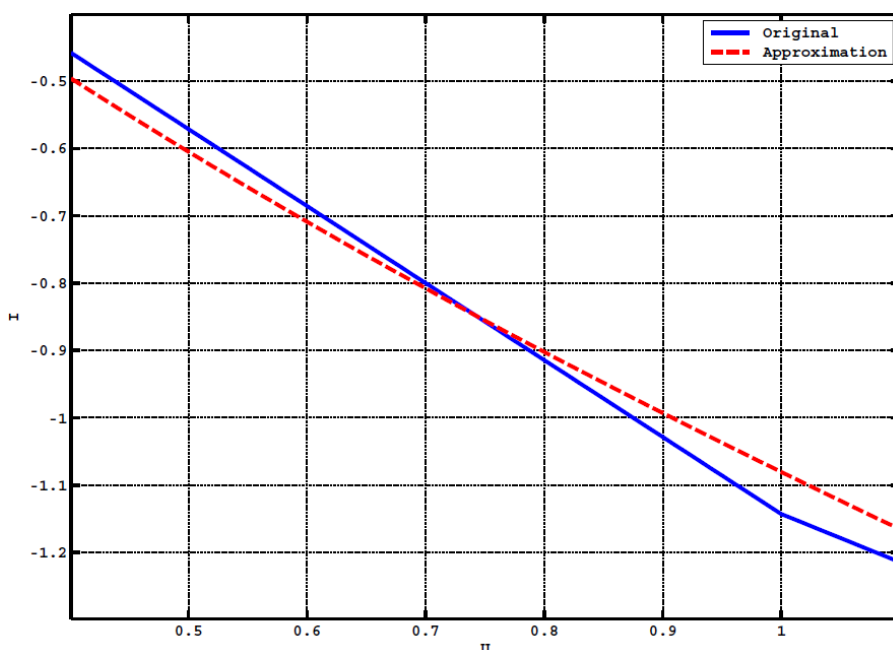
яка потрібна нам для нормування за часом.

Якщо розділимо праві частини виразів (9), (12) та (15) на значення ω , то одержимо, що одна одиниця (за часом) буде відповідати одному циклу коливань ω .

Тобто значення за часом, яке дорівнює, наприклад, величині 100, буде відповідати не 100 секундам, а 100 циклам коливань ω .



a)



б)

Рисунок 2 – Вольт-амперна характеристика негатрона:
а) без збільшення, б) із збільшенням.

Figure 2 – The volt-ampere characteristic of negatron:
a) without increase the scale, b) with increase the scale.

Класична теорія суперрегенерації говорить про те, що явище суперрегенерації буде проявлятися, якщо частота гасіння (частота переривання основних коливань генератора) буде в 100 ... 1000 разів (орієнтовно) менша за частоту основних коливань генератора [2, 3].

Приймемо, що це буде величина “у 100 разів”, та введемо відповідно величину $K=100$. Далі зафіксуємо цю величину K та не будемо надалі її змінювати. Тоді, в процесі моделювання, величина $RL\emptyset 1$ буде визначатись згідно виразу

$$RL\emptyset 1(t) = (1/12) + (1/12) \cdot \sin(t/K),$$

де (t/K) – час в одиницях ω у відповідності із розглянутим вище нормуванням.

При цьому $RL\emptyset 1$ буде змінюватися від значення

$$\frac{1}{12} - \frac{1}{12} = \emptyset$$

і до значення

$$\frac{1}{12} + \frac{1}{12} = \frac{2}{12} = \frac{1}{6}$$

із частотою, яка у 100 разів менша, ніж колова частота власних коливань контура $L\emptyset 1C\emptyset 2$.

При таких значеннях часу, враховуючи величину K , коливання встигнуть повністю “затухнути” (якщо і були до цього), тобто за той час, коли $RL\emptyset 1$ збільшується, генерація коливань стає неможливою (що і зазначено вище).

У відсутності вхідного (приймаючого) сигналу коливання у генераторі не виникають навіть у тому випадку, якщо для цього буде потенційна можливість (наприклад, коли величина $RL\emptyset 1(t)$ стає достатньо малою або навіть дорівнюватиме нулю).

Справа в тому, що стан системи диференціальних рівнянь у точці $(\emptyset; \emptyset; \emptyset)$, тобто коли $UC\emptyset 1 = \emptyset, UC\emptyset 2 = \emptyset$ та $IL\emptyset 1 = \emptyset$, є станом рівноваги (однак нестійкої, що перевіряється за допомогою відповідних математичних методів).

Однак коливання можуть виникати при досить малому відхиленні від точки рівноваги (наприклад, якщо маємо достатньо малий за величиною зовнішній сигнал).

При відсутності зовнішнього сигналу у генераторі, відповідно, не будуть спостерігатись спалахи генерації (якщо навіть потенційно такі умови і будуть періодично створюватись, оскільки величина $RL\emptyset 1(t)$ змінюється за часом з “частотою гасіння”).

Зрозуміло, що це стосується тільки ідеальної схеми, без внутрішніх шумів, тобто моделі, яка відповідає вище наведеній системі диференціальних рівнянь.

Слід зазначити, що реальна схема буде “запускатись”, як мінімум, під дією внутрішніх (власних) шумів, що ніяк не відбивається на загальних принципах побудови хаотичних супергенераторів.

Приймання зовнішнього слабкого сигналу

Як було зазначено вище, у відсутності зовнішнього сигналу, який приймається, ніякої генерації не спостерігається (модель “мовчить”).

Далі розглянемо приймання зовнішнього (слабкого) сигналу при умові роботи моделі.

З цією метою на кожному окремому кроці рішення ODE додавали випадкову “добавку”, імітацію цього сигналу (див. функцію MATLAB `rand()`) до величини напруги на конденсаторі $C\emptyset 1$. Така “добавка” складала $\emptyset \dots (1E - 6)$ вольт.

Модель здатна впевнено приймати і значно більш слабкі сигнали, навіть до $(1E - 12)$ вольт.

Для моделювання був необхідний також постійний крок інтегрування за часом. Інтегрування із змінним (адаптивним) кроком, яке MATLAB ODE23() та ODE45() виконують по умовчання, що авторів статті не задовільняло.

У цьому зв'язку процес інтегрування проводили методом Рунге-Кутта 4-го порядку, із контролем точності рішення та постійним кроком (за допомогою процедури, що була написана авторами статті). Крок інтегрування у даному випадку складав $1/10$ значення колової частоти вільних коливань контура $L\emptyset 1C\emptyset 2$.

Для повного "охоплення" всього процесу був необхідний також часовий інтервал у 10 одиниць коливань частоти гасіння, що при $K=100$ (див. вище) складало $10 \cdot 100 = 1000$ одиниць колової частоти вільних коливань контура $L\emptyset 1C\emptyset 2$.

Це і було загальним часом інтегрування.

Ще раз зазначимо, що в моделі відсутні внутрішні шуми, тому легко реалізується висока чутливість, яка для реальних схем буде навряд чи досягнута. Така властивість є однією із переваг використання математичного моделювання у даному дослідженні.

На рис.3 представлені результати моделювання при значенні $\alpha = 9.8$.

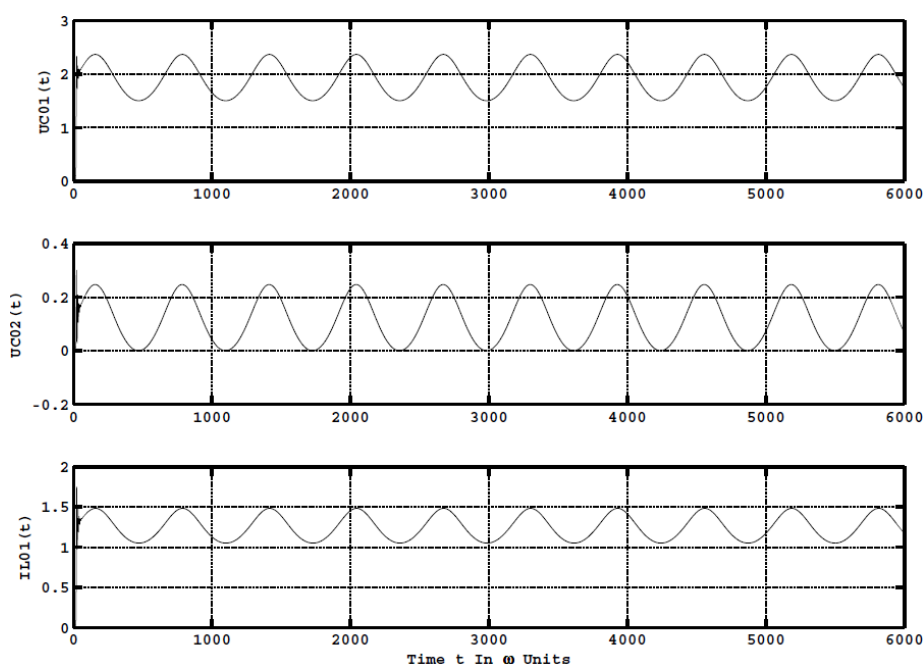


Рисунок 3 – Результати моделювання при значенні $\alpha = 9.8$.

Figure 3 – The result of modeling for $\alpha = 9.8$.

Як видно, явище суперрегенерації зовсім не проявляється.

При $\alpha = 10.9$ та послідуючих значеннях суперрегенерація стає все більш помітною (див. рис.4), а при значенні $\alpha = 11.5$ це явище проявляється вже досить чітко (рис. 5). При цьому форма сигналів відповідає лінійному режиму роботи суперрегенератора.

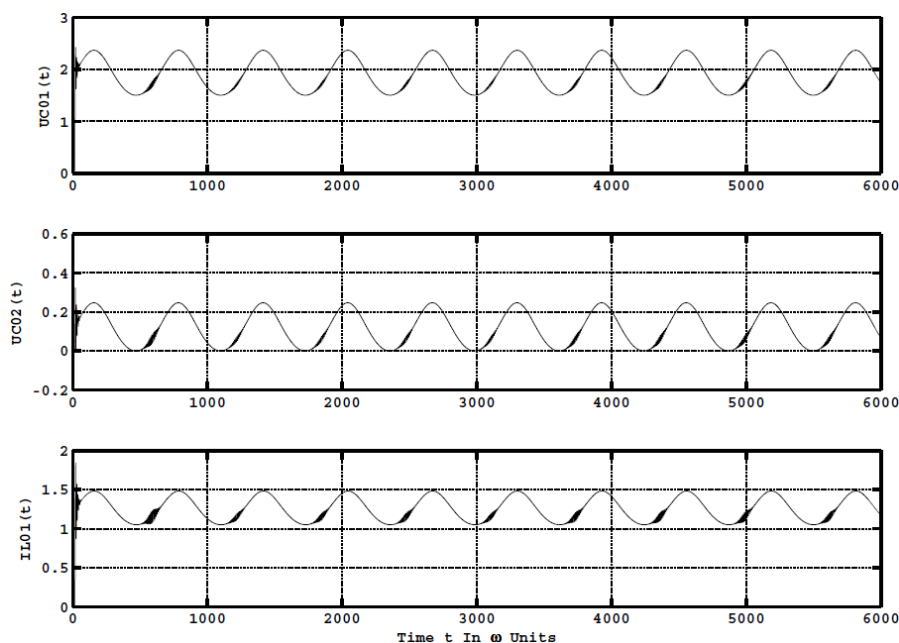


Рисунок 4 – Результати моделювання при $\alpha = 10.9$.
 Figure 4 – The result of modeling for $\alpha = 10.9$.

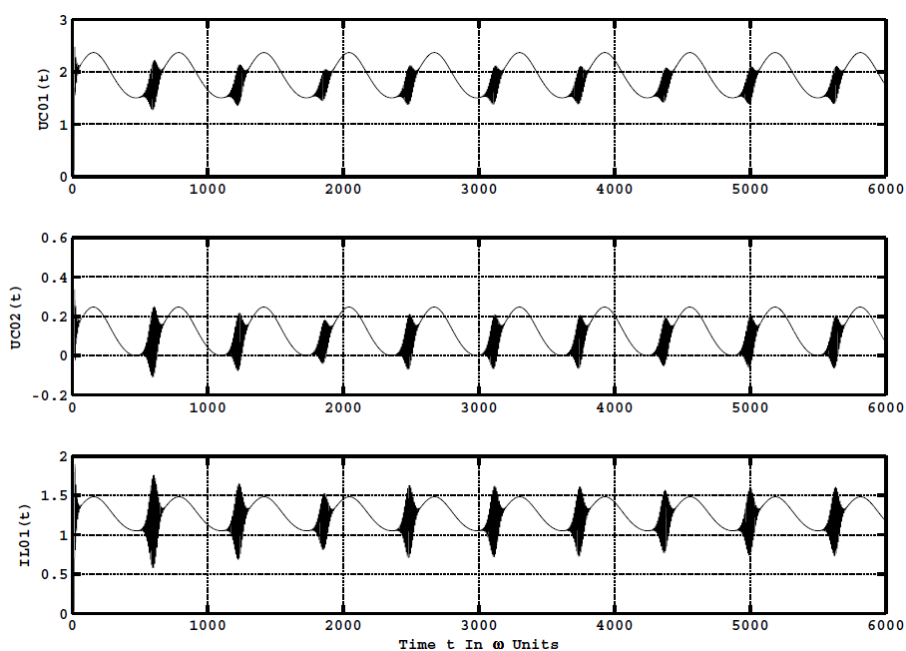
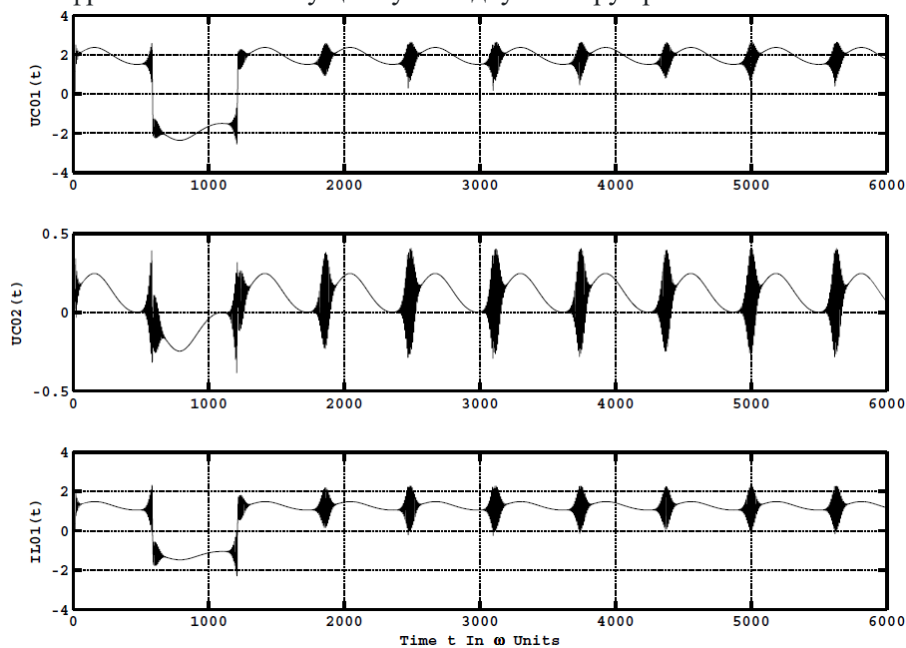


Рисунок 5 – Результати моделювання при $\alpha = 11.5$.
 Figure 5 – The result of modeling for $\alpha = 11.5$.

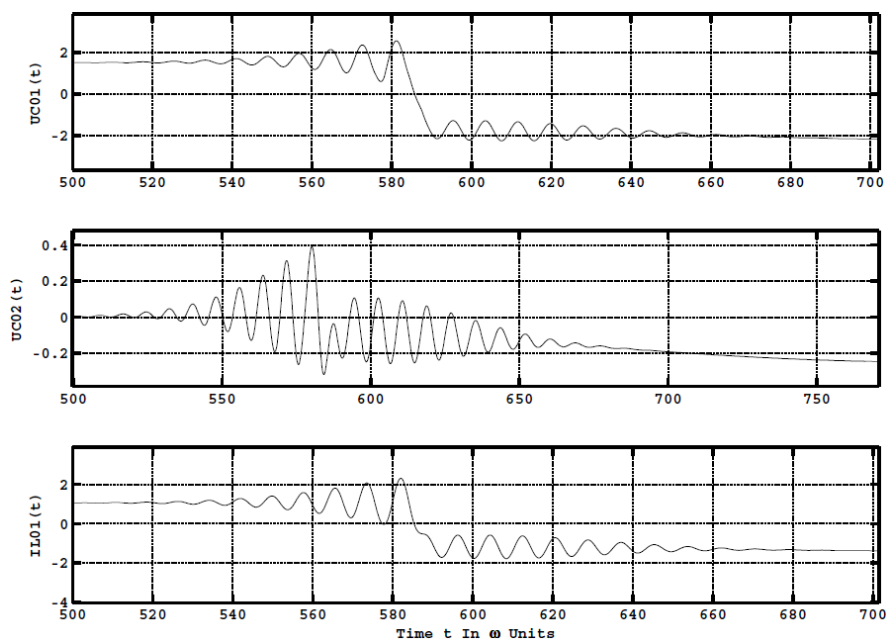
Однак при переході від значення $\alpha = 11.5$ до значення $\alpha = 11.8$ спостерігається якісна зміна режиму роботи суперрегенератора (рис. 6а).

Явище суперрегенерації супроводжується переключенням режимів від одного стану до іншого. У даному випадку – це переключення тригера, який утворений елементами схеми.

Збільшений фрагмент сигналів у цьому випадку ілюструє рис. 6б.



а)



б)

Рисунок 6 – Результати моделювання при $\alpha = 11.8$.

а) без збільшення, б) із збільшенням.

Figure 6 – The result of modeling for $\alpha = 11.8$:

а) without increase the scale, б) with increase the scale.

Як видно із рисунка 6б, форма “суперрегенеративного спалаху” виявилась достатньо складною. Цілком можливо, що такий “спалах” являє собою детерміновано-хаотичний сигнал.

Однак встановити це однозначно у даному випадку досить проблематично у зв'язку із малою тривалістю такого “спалаху”.

У подальшому зростання величини α призводить до ускладнення поведінки “спалаху”. Неможливо однозначно також стверджувати, що робота суперрегенератора далі буде відбуватись у лінійному режимі.

Скоріше за все, реалізується особливий режим роботи, характерний для суперрегенераторів, що побудовані на основі хаотичного генератора (рис.7).

Такий режим, на нашу думку, раніше не розглядався взагалі. При збільшенні параметру α цей режим проявляється все більш і більш виразно (див. рис. 8).

Збільшення параметру α до значень $\alpha \geq 12.4$ можливо було б класифікувати як повернення до класичного лінійного режиму.

Однак, скоріше за все, це явище пов'язане із відсутністю насичення, яке характерне для реального обладнання (у даному випадку це “надлишки” ВАХ негatrona). Тому моделювання при значеннях $\alpha \geq 12.4$ може бути неадекватним.

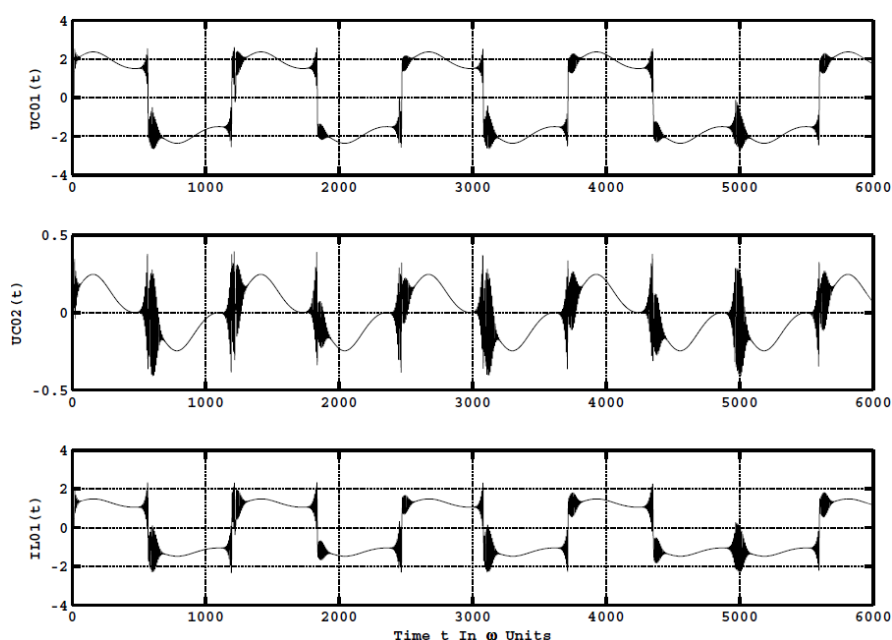


Рисунок 7 – Результати моделювання при $\alpha = 12.0$.

Figure 7 – The result of modeling for $\alpha = 12.0$.

Деякі особливості математичного моделювання суперрегенераторів

В ідеалі моделювання необхідно виконувати для всіх частот коливань, які мають значення для роботи суперрегенератора. Це, відповідно, частота сигналу, який приймається, частота суперизації та частота модуляції сигналу, що приймається.

Типове співвідношення частот для реальної конструкції може бути таким:

1. Частота ВЧ-сигналу, що приймається, дорівнює 30 МГц;
2. Частота суперизації 300 кГц;
3. Частота модуляції ВЧ-сигналу, що приймається, складає 3 кГц.

На першому етапі дослідження розглянемо тільки суперрегенерації із зовнішнім гасінням та АМ-модуляцією сигналу, який приймається.

Для того, щоб провести моделювання, необхідно одержати декілька мільйонів точок при вирішенні системи диференціальних рівнянь, та надалі візуалізувати це рішення.

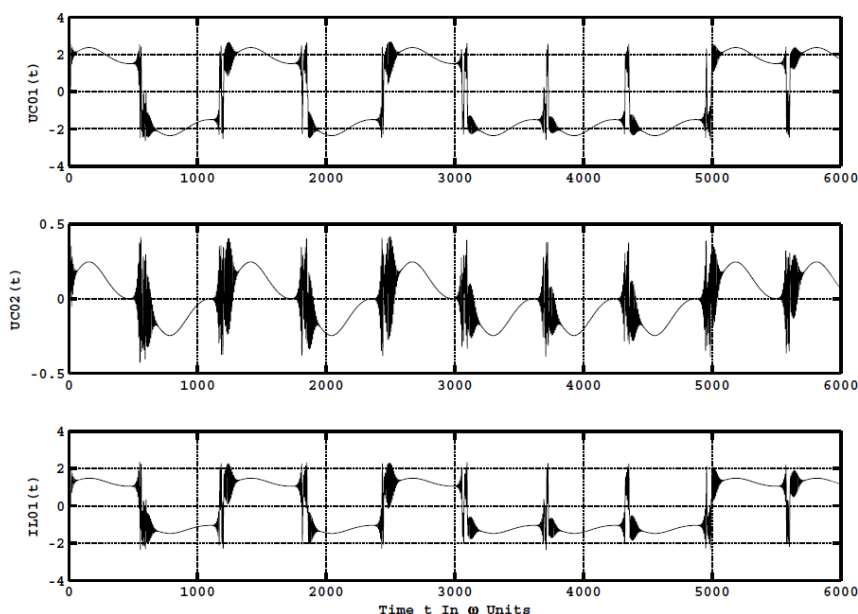


Рисунок 8 – Результати моделювання при $\alpha = 12.4$.

Figure 8 – The result of modeling for $\alpha = 12.4$.

При зміні параметрів за допомогою клавіатури зображення повинно змінюватись без затримок за часом. У цьому зв'язку замість трьох сигналів, кожний із яких відрізняється на два порядки за частотою, будемо аналізувати тільки два сигнали, тобто ВЧ-сигнал (30 МГц) та сигнал суперизації (300 кГц).

Це суттєво скорочує необхідну кількість точок при вирішенні диференціальних рівнянь (як мінімум, на два порядки), а також призводить до прискорення побудови зображення. Для адекватного моделювання у цьому разі достатньо буде візуалізувати лише декілька “спалахів” ВЧ-коливань (мінімум три).

Моделювання слід починати із використання мови програмування MATLAB. Це дозволяє дуже швидко побудувати та отлагодити відповідну модель. Але при цьому слід зазначити, що сама симуляція (робота моделі) буде проходити вкрай повільно. Для одержання одного зображення необхідно, наприклад, чекати декілька хвилин, або навіть більше.

У цьому зв'язку, якщо робота над моделлю у першому наближенні завершена, далі слід переходити на використання мов компілюючого типу (FORTRAN, C, PASCAL та інші), які можуть обходитись без обов'язкового об'єктно-орієнтованого програмування (ООП), яке сповільнює роботу відповідних програм.

Якщо при вирішенні системи диференціальних рівнянь в MATLAB можливо використовувати метод Рунге-Кутта високих порядків (із контролем помилок рішень та постійним кроком), то для

компілюючих мов краще застосовувати метод Ейлера (працює дуже швидко, але необхідно попередньо визначати адекватний крок інтегрування за часом).

Як показав наш досвід моделювання, багато явищ, що виникають у суперрегенераторах, неможливо побачити тільки на основі використання статичних зображень. Обов'язково повинна бути присутня анімація моделі.

Для вирішення задач анімації необхідно, як мінімум, одержувати десятки кадрів за секунду, щоб мати "миттєвий" відклик на зміну параметрів моделювання у "реальному масштабі" часу.

Мінімальне значення кількості кадрів/секунду можна прийняти як FPS=10.

Авторами була написана спеціальна програма для анімації моделі на мові PASCAL. При цьому використовувалась у тому числі бібліотека OPENGL сумісно із утилітою GLUT.

У загальному випадку частоти сигналів можуть відрізнятись у 1000, або навіть у 10000 разів.

Запропонована у статті методика розробки програм моделювання універсальна, може застосовуватись при дослідженнях будь-яких типів суперрегенераторів (із класичною побудовою, на основі хаотичних генераторів або генераторів інших типів).

Фрагмент програмного коду на мові програмування MATLAB

Рядки 3 ... 7 фрагменту призначені для очистки комадного вікна, закриття відкритих раніше графічних вікон та встановлення у початковий стан генератора "випадкових" чисел.

Рядки 18 ... 24 фрагменту декларують глобальні змінні.

Відповідно, рядки 33 та 34 встановлюють значення для змінних Alpha та K, 38 та 39 присвоюють вказівник на функцію, що визначає праві частини системи ODE змінної Fn, та присвоюють значення змінної NIForOneW (тобто кількість точок рішення ODE для часу, що відповідає одиниці ω частоти LC – контура). Рядки 43 ... 47 та 51 необхідні для присвоєння значень відповідним змінним. Рядки 55 ... 60 фрагменту призначені для знаходження колової частоти ω LC – контура генератора (суперрегенератора).

TimeStart (завжди нуль) та TimeStop – час початку та закінчення інтегрування (квантується для зручності представлення графіків у тисячах одиниць), NI – загальна кількість кроків (ітерацій), які повинен зробити інтегратор ODE для інтегрування на відріжку часу TimeStart ... TimeStop. Змінна VTime необхідна при звертанні до функції інтегрування ODE04A (), яка розроблена авторами, VInit – вектор початкових умов (всі нулі).

Далі виконується інтегрування системи ODE з постійним кроком за часом за допомогою ODE04A (), код якої у статті не приводиться, а також відповідна побудова графіків рішення системи ODE для початкових умов на даному часовому інтервалі.

У рядку 82 вилючаються всі змінні, оскільки це кінець програми (присутність у коді взагалі не обов'язкова).

Далі приводиться код необхідних для роботи основної програми допоміжних функцій. Функція FnRL01 () виконує роль модулятора доброздатності індуктивності L01 (модуляція опору втрат RL01). Функція NLF () формулює вольт – амперну характеристику негatrona.

Функція FnODE () необхідна для представлення правих частин системи ODE і має деякі особливості, які представлені нижче.

Декларація глобальних змін подана у рядках 114 ... 120. Далі, в рядках 122 ... 124, визначається напруга на конденсаторах C01 та C02, а також струм через індуктивність L01.

Зазначимо, що це – миттєві величини.

Далі маємо виклик функції $F_{nRL\emptyset 1}(\)$, яка визначає опір $RL\emptyset 1$ на даний момент часу.

Очевидно, що величина $RL\emptyset 1$ з часом постійно змінюється. В рядках 126 та 127 наведені величини $UC\emptyset 1$ та $IR\emptyset 1$, необхідні для розрахунків.

В даному разі до вихідного миттєвого значення $UC\emptyset 1$ додається деяка мала “випадкова” величина, яка імітує слабкий сигнал, що приймається.

Зрозуміло, що це не найкращий варіант дослідження властивостей хаотичного суперрегенератора. Але, мабуть, це практично єдиний варіант для визначення процесу підсилення слабого сигналу, що приймається.

У рядках 128 ... 130 фрагменту вихідного коду формується кінцевий результат.

На цьому у багатьох програмах звичайно завершуються функції виду $F_{nODE}(\)$. Однак, у даному випадку, це не так. Слід пам'ятати також про нормування за часом (див. вище). Тому вихідні змінні $Out(1)$, $Out(2)$ та $Out(3)$ додатково обробляються.

Також необхідно звернути особливу увагу при діленні на W (колової частоти LC – контура хаотичного суперрегенератора).

У даному випадку ділення на W призводить до того, що “всередині” функції F_{nODE} змінна T буде являтися не часом в секундах, а відповідати “часу одного циклу ω ” (див. вище). Тобто, якщо діяти класично, ми повинні були б записати вираз $\sin(\omega \cdot t/K)$ у вигляді нотації *MATLAB* $\sin(W.* T./K)$.

Але, враховуюче зроблене нормування, це буде $\sin(T./K)$, що видно при аналізі коду функції $F_{nRL\emptyset 1}(\)$, оскільки вона викликається “всередині” функції $F_{nODE}(\)$.

Тобто важлива особливість коду - ретельне урахування зробленого нормування

Далі див. фрагмент коду програми.

Висновки

В роботі вперше розглянуто принцип хаотичної суперрегенерації та його застосування у задачах моніторингу.

Аналізується хаотичний автогенератор, що працює у суперрегенеративному режимі.

При цьому хаотичний суперрегенератор використовує режим переривчастих коливань.

Складена математична модель хаотичного суперрегенератора. Розроблене відповідне програмне забезпечення для дослідження поведінки моделі.

Досліджений сценарій переходу до хаосу для математичної моделі роботи суперрегенератора.

Визначено, що при зміні параметру α (відношенні величин ємностей конденсаторів схеми) спостерігається зміна режимів суперрегенерації – від лінійного хаотичного режиму без переключень до хаотичного режиму із переключенням.

Тобто навіть при попередньому дослідженні відкриті два нових режими суперрегенерації.

Завдяки проведеному дослідженню суттєво доповнені існуючі явища суперрегенерації. Якщо раніше було відоме, що “класичні” суперрегенератори можуть у короткому проміжку часу проявляти детерміновано-хаотичну поведінку, то наразі можливо стверджувати, що суперрегенератори, побудовані на базі хаотичних генераторів, демонструють як режими, схожі на режими класичних суперрегенераторів, так і проявляють свою, нетривіальну поведінку.

F:\SR_15_07_2023.M
 Страница 1 из 4
 2023-10-05 16:55:02

```

1  function [ ] = SR_15_07_2023( )
2
3  clc( )
4  close( 'all' )
5  rand( 'seed' , 0 )
6  randn( 'seed' , 0 )
7  pause( 1 ./ 10 )
8
9  %=====
10 % Our SuperReGenerator Base Of The Chaotic Generator By      %
11 % Chua L ( Attractor Type "DS" )                             %
12 % We Use Following Parameters                                 %
13 % Alpha = 9 ... 50                                           %
14 % K = 100                                                     %
15 % RL01 = 0 ... 1 / 6                                         %
16 %=====
17
18 global C01
19 global C02
20 global K
21 global L01
22 global R01
23 global RL01
24 global W
25
26 %::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::%
27 % Alpha = 9 ... 50                                           %
28 %::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::%
29 % Approximately Under Alpha = 11.8 Begins To Appear Mode    %
30 % Of The Flip - Flop Switching                               %
31 %::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::%
32
33 Alpha = 12.4;
34 K = 100;
35
36 %::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::%
37
38 Fn = @ FnODE;
39 NIForOneW = 10;
40
41 %::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::%
42
43 C01 = 1 ./ 9;
    
```

F:\SR_15_07_2023.M

Страница 2 из 4

2023-10-05 16:55:02

```

44 C02 = 1;
45 L01 = 1 ./ 7;
46 R01 = 10 ./ 7;
47 RL01 = 1 ./ 12;
48
49 %::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::%
50
51 C01 = C02 ./ Alpha;
52
53 %::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::%
54
55 W = 1 ./ sqrt( L01 .* C02 );
56 TimeStart = 0;
57 TimeStop = quant( 60 .* K , 1000 );
58 NI = NIForOneW .* TimeStop;
59 VTime = [ TimeStart ; TimeStop ];
60 VInit = [ 0 ; 0 ; 0 ];
61
62 %::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::%
63 % The Code Of The Finding Of The ODE Solution By Authors      %
64 % Procedure ODE04A( )                                         %
65 % This Part Of Programme Code Is Not Given                   %
66 % [ VOut , MOut ] = ODE04A( Fn , VTime , VInit , NI );      %
67 %::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::%
68
69 %::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::%
70 % ----- %
71 %::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::%
72
73 %::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::%
74 % Commands For Plot Graphics                                  %
75 % This Part Of Programme Code Is Not Given                   %
76 %::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::%
77
78 %::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::%
79 % ----- %
80 %::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::%
81
82 clear( 'all' )
83
84 %::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::%
85
86 end

```

F:\SR_15_07_2023.M

Страница 3 из 4

2023-10-05 16:55:02

```
87
88 %:.....%
89 % Here Code Of The Auxiliary Procedures ( Functions ) %
90 % Is Found %
91 %:.....%
92
93 function [ ] = FnRL01( T )
94 global K
95 global RL01
96 RL01 = ( 1 ./ 12 ) + .....
97 ( 1 ./ 12 ) .* sin( T ./ K );
98 end
99
100 function [ Out ] = NLFOriginal( In )
101 A = - 8 ./ 10;
102 B = - 5 ./ 10;
103 BP = 1;
104 Out = B .* In + ( A - B ) .* .....
105 ( abs( In + BP ) - abs( In - BP ) ) ./ 2;
106 end
107
108 function [ Out ] = NLF( In )
109 K = [ - 4.7700E-001 ; - 2.7825E-001 ; + 1.5715E+000 ];
110 Out = K( 1 ) .* In + K( 2 ) .* atan( K( 3 ) .* In );
111 end
112
113 function [ Out ] = FnODE( T , In )
114 global C01
115 global C02
116 global K
117 global L01
118 global R01
119 global RL01
120 global W
121 Out = zeros( 3 , 1 );
122 UC01 = In( 1 );
123 UC02 = In( 2 );
124 IL01 = In( 3 );
125 FnRL01( T );
126 UC01 = UC01 + 1E-6 .* rand( );
127 IR01 = ( UC01 - UC02 ) ./ R01;
128 Out( 1 ) = - IR01 + NLF( - UC01 );
129 Out( 2 ) = IR01 - IL01;
```

- 3 -

F:\SR_15_07_2023.M

Страница 4 из 4

2023-10-05 16:55:02

```

130 Out( 3 ) = UC02 - RL01 .* IL01;
131 Out( 1 ) = Out( 1 ) ./ ( W .* C01 );
132 Out( 2 ) = Out( 2 ) ./ ( W .* C02 );
133 Out( 3 ) = Out( 3 ) ./ ( W .* L01 );
134 end
135

```

Перелік посилань

1. Арш Е.І. Автогенераторні методи та засоби вимірювань. –1979. – 256 с.
2. Белкін М.К. Суперрегенеративний радіоприйом: – Київ, Техніка, 1968. – 203 с.
3. Белкін М.К., Кравченко Г.І., Скоробутов Ю.Г., Стрюков Б.А. Суперрегенератори. –1983. – 248 с.
4. Chua L.O., Komura M., Matsumoto T. The double scroll family. IEEE. Transactions on Circuits & systems. – 1986, Vol. CAS – 33, № 11. – p.p. 1073 – 1118.
5. Matsumoto T. Chaos in Electronic Circuit. – IEEE, Vol. 75, №8. 1987. – p.p. 1033–1057.
6. Shuxian Wu. Chua’s Circuits Family. – IEEE, Vol. 75, №8. 1987. – p.p. 1022–1032.

USE CHAOTIC SUPERREGENERATOR IN PROBLEM OF THE MONITORING (PART 1)

Vladuslav Artemenko, *UT5UDJ*, Master of Ecology, Ukrainian Hydrometeorological Institute, State Service on Emergencies of Ukraine and National Academy of Science of Ukraine, Hydrochemical Research, Scientific Employee, e-mail: artemenko@uhmi.org.ua, tel. 380936011250, Nauki avenue, 37, Kyiv, Ukraine, 03028, room 34, <https://orcid.org/0000-0003-0536-5415>

Volodymyr Petrovych, Candidate of Technical Sciences, Professor, Senior Researcher, Professor of the Transportation Construction and Property Management Department, National Transport University. e-mail: petrovichvv60@ukr.net, tel. +380442807338, Ukraine, 01010, Kyiv, street M. Omelyanovicha-Pavlenka, 1, room 138, <https://orcid.org/0000-0003-0422-2535>

Abstract. For the first time, the new type of the superregeneration was considered as follows chaotic superregeneration.

Earlier superregenerators were realized on base only generator periodic oscillations.

The offered authors chaotic superregenerator is built on base of chaotic autogenerator working in intermittent mode.

Mathematical model of chaotic superregenerator is formed on base of the system of the ordinary differential equations.

Software was created on programming languages MATLAB, FORTRAN and PASCAL for study of the behaviour model of chaotic superregenerator.

It is specifically noted that the model of superregenerator is obliged vastly to amplifying the weak input signal.

It in this connection was for the first time demonstrated possibility of the amplification weak input signal with the help of the chaotic superregenerator.

One of the possible realization of chaotic superregenerator with external intermittent is considered in article. Since steady – state figures do not allow adequately to analyse work the superregenerators and often do not allow to identify presence the superregenerative mode at modelling that in article was offered to use the animation.

In this connection authors was designed special software on FORTRAN and PASCAL with use OPENGL and GLUT. In article is brought fragment of the program for modelling the work of chaotic superregenerator on programming language MATLAB.

Is it for the first time offered universal methods to identifications superregenerative mode which can be used at study any types of superregenerators.

The goal of work

1.The study open authors the phenomenas of chaotic superregeneration on example one of the device realizing given phenomena (chaotic superregenerative receiver with external intermittently).

2.Creation the software for study of different types of superregenerators with use animation.

3.The development of the universal methods to identification superregenerative mode for any types device realizing this mode.

Keywords: The new type of the superregeneration, chaotic superregeneration, chaotic autogenerator working in intermittent mode, chaotic superregenerator with external intermittenty, universal methods to identification superregenerative mode, animation result of the work to models with use OPENGL and GLUT.

References

1. Arsh E.I. Avtogeneratednyye sposoby i sredstva izmereniy. – Mashinostroyeniye, 1979. – 256 s.
2. Belkin M.K. Sverkhregenerativnyy radiopriyom: – K.: Tekhnika, 1968. – 203 s.
3. Belkin M.K., Kravchenko G.I., Skorobutov Yu.G., Stryukov B.A. Sverkhregeneratory. – 1983. – 248 s.
4. Chua L.O., Komura M., Matsumoto T. The double scroll family. IEEE. Transactions on Circuits & systems. – 1986, Vol. CAS – 33, № 11. – p.p. 1073 – 1118.
5. Matsumoto T. Chaos in Electronic Circuit. – IEEE, Vol. 75, №8. 1987. – p.p. 1033–1057.
6. Shuxian Wu. Chua’s Circuits Family. – IEEE, Vol. 75, №8. 1987. – p.p. 1022–1032.