

**ЗАСТОСУВАННЯ СУПЕРРЕГЕНЕРАТИВНИХ ПРИЙМАЧІВ
ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ ОТОЧУЮЧОГО СЕРЕДОВИЩА**

**APPLICATION OF SUPERREGENERATIVE RECEIVERS
IN ENVIRONMENTAL STUDIES (MONITORING)**



Артеменко Владислав Андрійович, магістр екології, e-mail: ut5udji@ukr.net, тел. 380936011250, Україна, м. Київ.

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



Петровиц Володимир Васильович, кандидат технічних наук, професор, старший науковий співробітник, професор кафедри транспортного будівництва та управління майном Національного транспортного університету. e-mail: petrovichvv60@ukr.net, тел. +380442807338, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, к. 138.,

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

Анотація. Складена нелінійна модель, що описує роботу суперрегенератора із зовнішнім гасінням.

З метою встановлення зв'язку між явищами суперрегенерації та детермінованим хаосом використані глобальні та локальні показники Ляпунова.

Класично прийнято про наявність або відсутність детермінованого хаосу в системі роботи висновок за знаком старшого глобального показника Ляпунова.

Величина старшого глобального показника λ_1 при роботі суперрегенератора завжди мати від'ємну величину, що свідчить про відсутність детермінованого хаосу при реалізації суперрегенеративного режиму. Зазначимо, що величина старшого локального показника Ляпунова λ_1 (Local) при роботі на дуже короткі проміжки часу може приймати позитивні значення, що свідчать "спалахи" локального хаосу.

Тобто існує "глибинний" зв'язок суперрегенерації із детермінованим хаосом.

При проведенні дослідження також встановлено, що при лінійному та нелінійному режимах роботи суперрегенератора спостерігається значна відмінність за величиною значень головного глобального показника Ляпунова λ_1 . Це дозволяє чітко розрізнити ці режими.

Мета роботи. Досконале дослідження проявів детермінованого хаосу при реалізації роботи суперрегенератора із зовнішнім гасінням (як при лінійному, так і нелінійному режимах).

Ключові слова: оточуюче середовище, моніторинг, суперрегенеративні приймачі, показники Ляпунова, режими роботи суперрегенератора .

*Ми думали, що нам потрібна інформація,
але насправді нам потрібні знання.
Нейт Сільвер. "Сигнал та шум: Чому
одні прогнози збуваються, а другі ні."
Переклад з англ.*

Вступ

Один із методів моніторингу оточуючого середовища, розробці якого за останній час приділяється підвищена увага, заснований на оцінці взаємодії слабого електромагнітного випромінювання із цим середовищем. Будь-яке середовище реагує появою відклику на певне випромінювання. При цьому у якості детекторів використовують різноманітні конструкції приймачів, у тому числі приймачів суперрегенеративних. Такі приймачі, як відомо, дуже прості за схемою, мають мініатюрні розміри. Крім того, демонструють значне число різних режимів своєї роботи.

Суперрегенератори володіють достатньо високою чутливістю при непоганій селективності, яку можливо покращувати вибором відповідного режиму роботи. Суперрегенеративні приймачі також дозволяють обробляти сигнали з різними типами модуляції, що взагалі не є притаманним для інших видів відповідного обладнання.

Класичні схеми суперрегенераторів звичайно розроблені на основі генераторів періодичних коливань із переривчастою генерацією. При цьому навіть відомі схеми мають специфічні властивості, які певною мірою залишаються не дослідженими і до теперішнього часу.

Нелінійна модель суперрегенератора

На рис. 1 приведена модель (схема) такого суперрегенератора. Схема нелінійна за рахунок використання негatrona $N\emptyset 1$.

При цьому амплітуда коливань може зростати реально тільки до кінцевої (та відносно невеликої) величини.

Розглянемо систему звичайних диференціальних рівнянь, що описує цю схему.

Для контура $N\emptyset 1/C\emptyset 1$ маємо

$$UN\emptyset 1 + UC\emptyset 1 = \emptyset, \quad (1)$$

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

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

Для контура $C\emptyset 1/L\emptyset 1/E\emptyset 1$ маємо відповідно

$$E\emptyset 1 = -UC\emptyset 1 + UL\emptyset 1, \quad (4)$$

$$UL\emptyset 1 = UC\emptyset 1 + E\emptyset 1, \quad (5)$$

$$L\emptyset 1 \cdot \frac{dIL\emptyset 1}{dt} = UC\emptyset 1 + E\emptyset 1. \quad (6)$$

Для контура $C\emptyset 1/R\emptyset 1$

$$-UC\emptyset 1 + UR\emptyset 1 = \emptyset, \quad (7)$$

$$UR\emptyset 1 = UC\emptyset 1, \quad (8)$$

$$IR\phi 1 = \frac{UR\phi 1}{R\phi 1} = \frac{UC\phi 1}{R\phi 1}, \quad (9)$$

Тобто остаточно

$$IR\phi 1 = \frac{UC\phi 1}{R\phi 1} \quad (10)$$

Для вузла 2

$$IN\phi 1 - IC\phi 1 - IL\phi 1 - IR\phi 1 = \phi, \quad (11)$$

$$IC\phi 1 = -IL\phi 1 - IR\phi 1 + IN\phi 1, \quad (12)$$

$$C\phi 1 \cdot \frac{dUC\phi 1}{dt} = -L\phi 1 - IR\phi 1 + IN\phi 1. \quad (13)$$

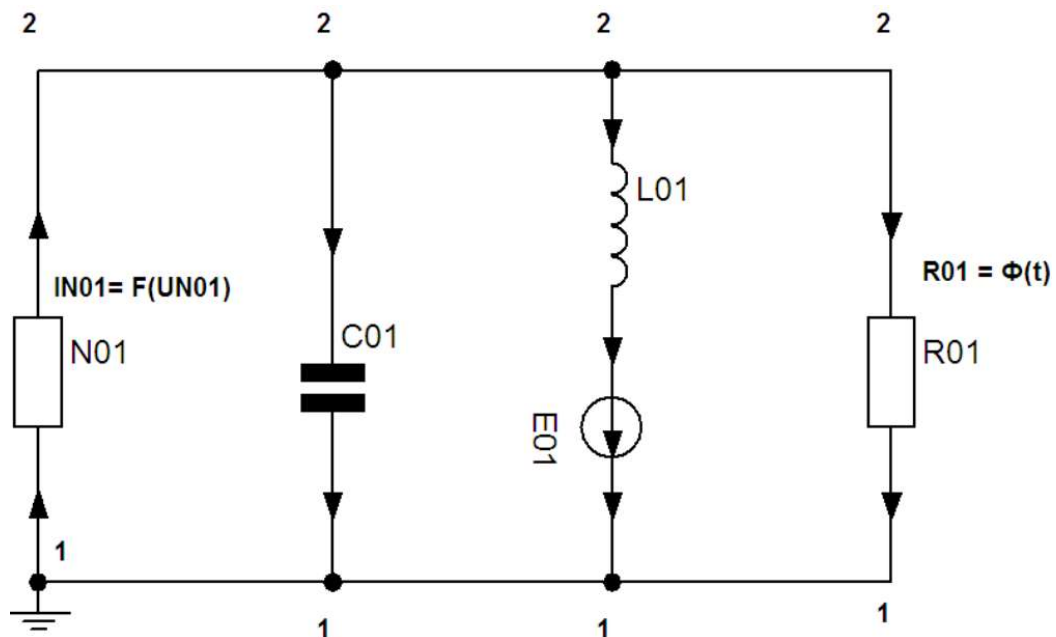


Рисунок 1 – Нелінійна модель суперрегенератора
Figure 1 – Nonlinear model of a superregenerator

Вольт-амперна характеристика негatrona N01

ВАХ негatrona може описувати поліном третього ступеня, де X - напруга (у вольтах), Y - струм (у амперах):

$$Y = \frac{1}{3} \cdot X^3 - \frac{4}{3} \cdot X = \frac{1}{3} \cdot X(X-2) \cdot (X+2).$$

В термінах ВАХ негatrona $N\phi 1$ маємо $IN\phi 1 = \psi(UN\phi 1) = UN\phi 1 \cdot (UN\phi 1 - 2) \cdot (UN\phi 1 + 2) / 3$.

Відповідний графік ВАХ приведений на рис.2.

Закон зміни опору $R\phi(t)$.

Далі визначимо закон зміни опору залежно від часу (t). Задача була вирішена проведенням відповідних числових експериментів безпосередньо із моделлю.

Числові експерименти показали, що достатньо добрі результати були досягнуті при значеннях $R\phi1Mean=7/10$ та $R\phi1Delta=1/10$.

Остаточо закон зміни величини $R\phi1$ має вид

$$R\phi1 = R\phi1Mean + R\phi1Delta \cdot \sin(W \cdot t/k),$$

де W - власна частота LC - контура.

Зважаючи, що у даному випадку $C\phi1=1$ та $L\phi1=1$, тому маємо $W=1$.

Зазначимо, що напруга подається із частотою суперізації (частотою гасіння).

При цьому опір $R\phi1$ можливо включати як послідовно з $L\phi1$, так і паралельно. У даному випадку найкращі результати досягаються при паралельному включенні.

При натурній реалізації схеми опір $R\phi1$ - окрема схема, виконана на польових транзисторах.

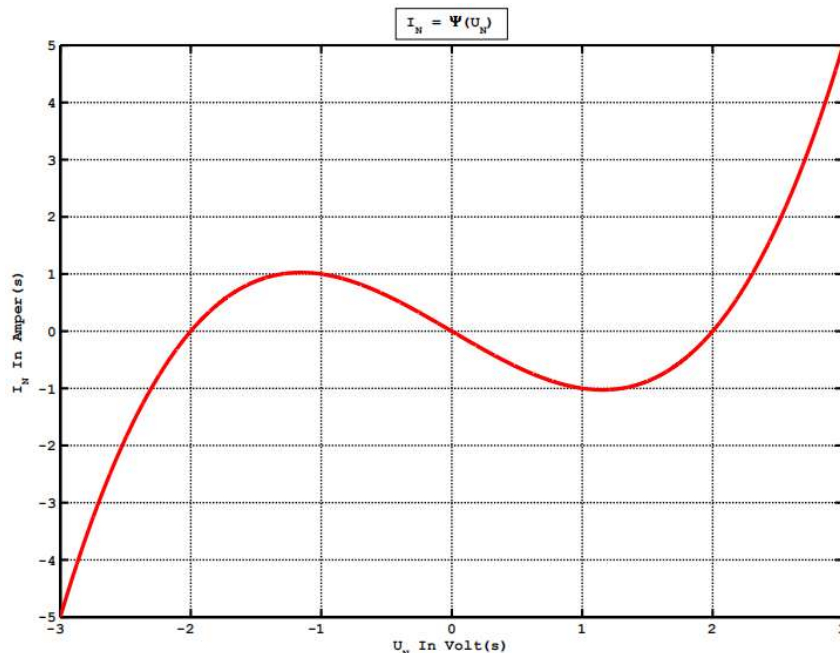


Рисунок 2 – Вольт-амперна характеристика негатрона, який був використаний в моделі суперрегенератора

Figure 2 – Volt-ampere characteristic of the negatron which was used in the superregenerator model

Суперрегенерація та хаос у динамічній системі.

При проведенні дослідження поведінки моделі суперрегенератора було б цілком достатньо знайти рішення для відповідної системи диференціальних рівнянь, наведених вище.

Але у ХХ-му сторіччі було відкрито та надалі мало широке практичне застосування положення детермінованого хаоса, що значно розширило рамки уявлень про природу багатьох явищ.

Як відомо, найбільш простий підхід для визначення детермінованого хаоса - це аналіз значень показників Ляпунова для даної динамічної системи.

Вважається, що у системі хаос присутній при наявності навіть одного глобального позитивного показника .

Зазначимо, що у відповідній науковій літературі були спроби висвітлення цього питання, але адекватного тлумачення вони не мали.

При проведенні дослідження необхідного було перш за все систему диференціальних рівнянь (6) та (13) представити як систему рівнянь автономних, а також визначити у аналітичному виді матрицю Якобі для такої системи.

Очевидно, що при зміні виду *ВАН* негатрона відповідні елементи матриці Якобі також будуть змінюватись.

Дослідження проводили за допомогою аналітично-числового QR - методу.

Приймемо, що

$$E\phi_1 = E\phi_1 \text{Max Sin}(w t),$$

$$E\phi_1 \text{Max} = 1E-6$$

Тоді, враховуючи наведені вище вирази, маємо

$$UN\phi_1 = -UC\phi_1,$$

$$IN\phi_1 = \psi(IN\phi_1)$$

$$R\phi_1 = R\phi_1 \text{Mean} + R\phi_1 \text{Delta} \cdot \text{Sin}(W \cdot t / k),$$

$$IR\phi_1 = \frac{UC\phi_1}{R\phi_1}, E\phi_1 = E\phi_1 \text{Max Sin}(w t),$$

$$C\phi_1 \cdot \frac{dUC\phi_1}{dt} = -IL\phi_1 - IR\phi_1 + IN\phi_1.$$

Та

$$L\phi_1 \cdot \frac{dIL\phi_1}{dt} = UC\phi_1 + E\phi_1.$$

Позначимо $w t = z$.

Відповідно $\frac{dz}{dt} = \frac{d(w t)}{dt} = w$.

Тобто у систему диференціальних рівнянь слід додати ще рівняння виду $\frac{dz}{dt} = w$.

Таким чином, можливо одержувати автономну систему звичайних диференціальних рівнянь (ДР), де час у явному виді вже не фігурує.

Як з'ясувалось, в процесі експериментів одержували один і той же спектр.

Величина старшого глобального показника Ляпунова при цьому мала постійну та негативну величину $\lambda_1(t)$, тобто величину "локального" старшого показника.

Із цього витікає важливий висновок, що детермінований хаос у суперрегнераторі із зовнішнім гасінням відсутній.

Можливо навіть припустити, що величина старшого глобального показника визначається перш за все значеннями, які приймають $R\phi_1$.

Деякі результати дослідження

На рис. 3 приведений результат дослідження роботи суперрегенератора при значенні $K=10$.

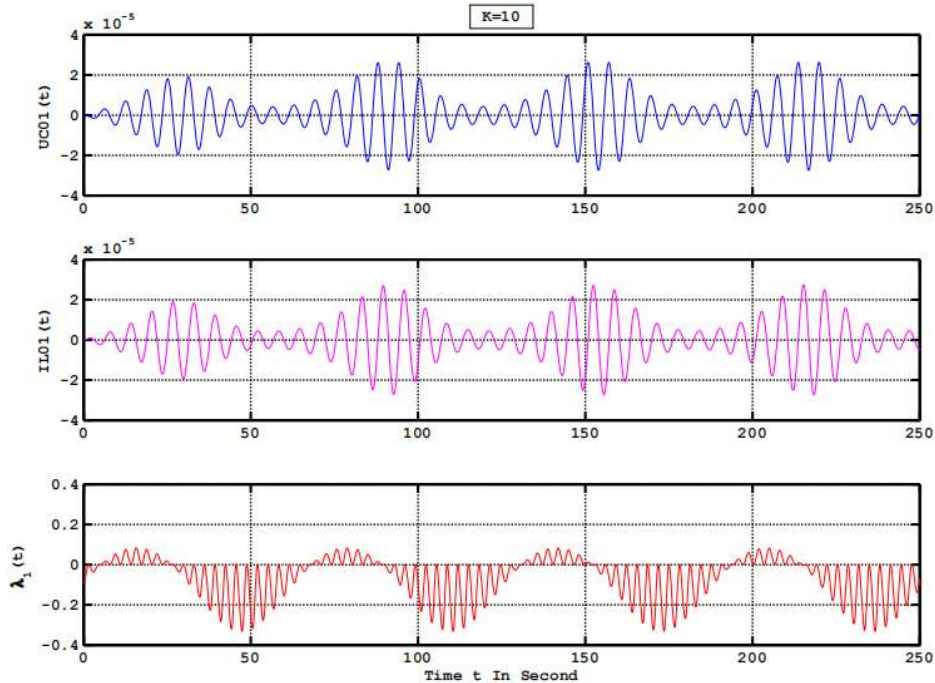


Рисунок 3 – Результати дослідження суперрегенератора при значенні $K=10$
Figure 3 – Results of the superregenerator studies with $K=10$

Зрозуміло, що у даному випадку суперрегенератор працює виключно у когерентному режимі, оскільки частота гасіння велика. Підсилення слабкого вхідного сигналу практично не спостерігається (у порівнянні із тим, що має місце при “розвинутій суперрегенерації”).

Локальний показник Ляпунова $\lambda_1(t)$ у окремі, невеликі проміжки часу, може приймати навіть позитивні значення. Це стосується переважно моментів із самого початку зростання “спалахів” суперрегенерації.

При значенні $K=25$ когерентний режим ще зберігається, але при $K=50$ спостерігаємо вже певний перехід від когерентного режиму роботи до некогерентного.

Приблизно при значенні $K=100$ маємо початок роботи у некогерентному лінійному режимі (рис. 4).

При $K=150$ – тенденція певного насичення, перехід до нелінійного режиму роботи суперрегенератора (дивись рис. 5).

На рис. 6 подано графік при нелінійному режимі. При цьому перехід від лінійного режиму роботи до нелінійного режиму при збільшенні значення параметру K відбувається поступово, достатньо повільним чином. Також при збільшенні значення параметру K , як було зазначено вище, маємо зменшення частоти гасіння.

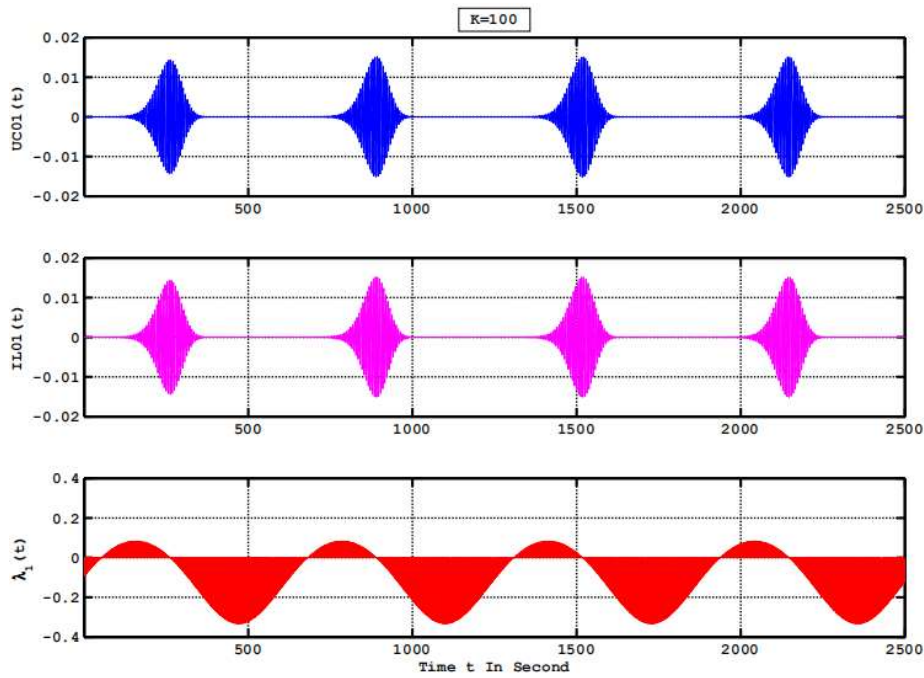


Рисунок 4 – Результати дослідження суперрегенератора при значенні $K = 100$
Figure 4 – Results of the superregenerator studies with $K = 100$

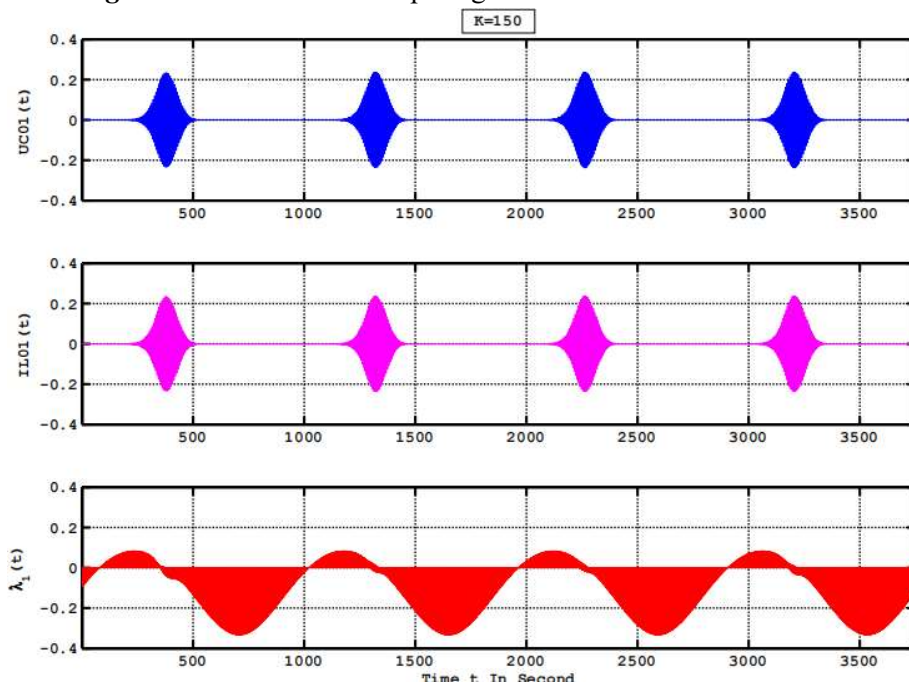


Рисунок 5 – Результати дослідження суперрегенератора при значенні $K = 150$
Figure 5 – Results of the superregenerator studies with $K = 150$

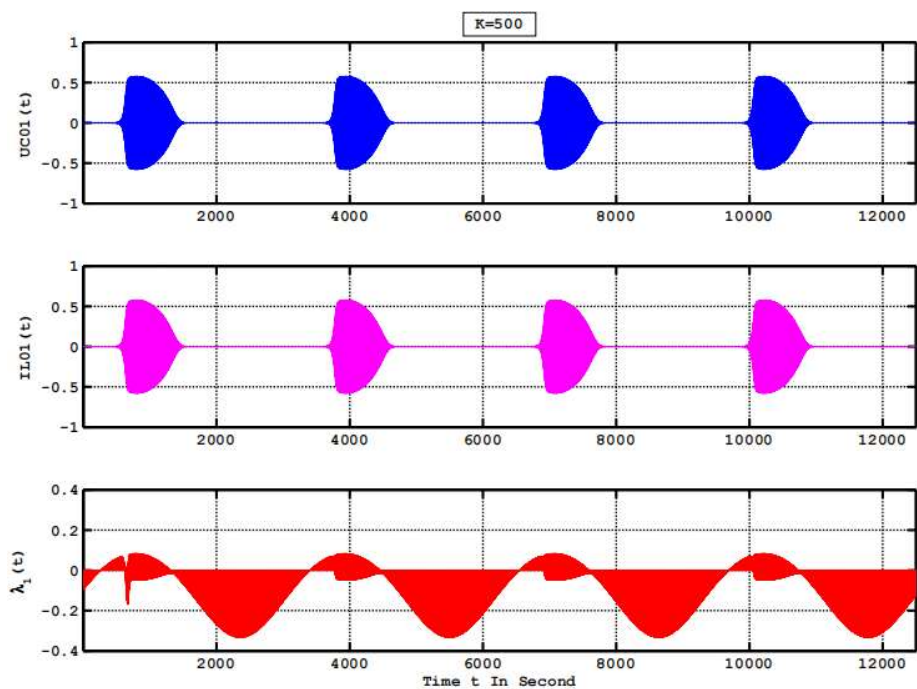


Рисунок 6 – Результати дослідження суперрегенератора при значенні $K = 500$
Figure 6 – Results of the superregenerator studies with $K = 500$

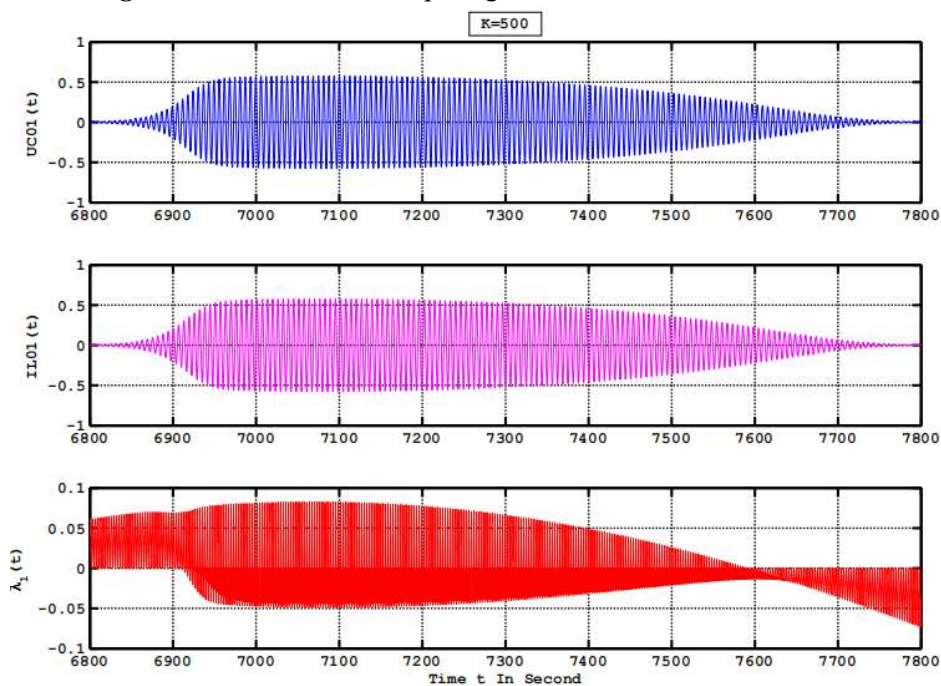


Рисунок 7 – Результати дослідження суперрегенератора при значенні $K = 500$ (збільшений фрагмент рис. 6)

Figure 7 – Results of the superregenerator studies with $K = 500$ (Enlarged fragment of Figure 6)

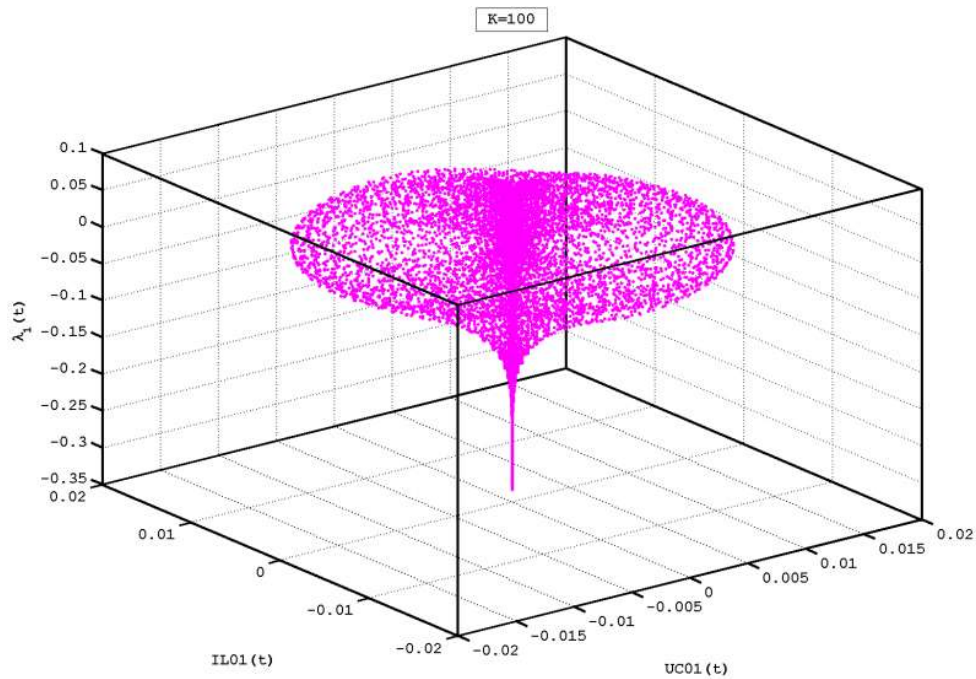


Рисунок 8 – Тривимірний графік $\lambda_1(t)/IL\emptyset 1(t)/UC\emptyset 1(t)$ при значенні $K = 1\emptyset$
Figure 8 – Three-dimensional graph for $\lambda_1(t)/IL\emptyset 1(t)/UC\emptyset 1(t)$ for $K = 1\emptyset$

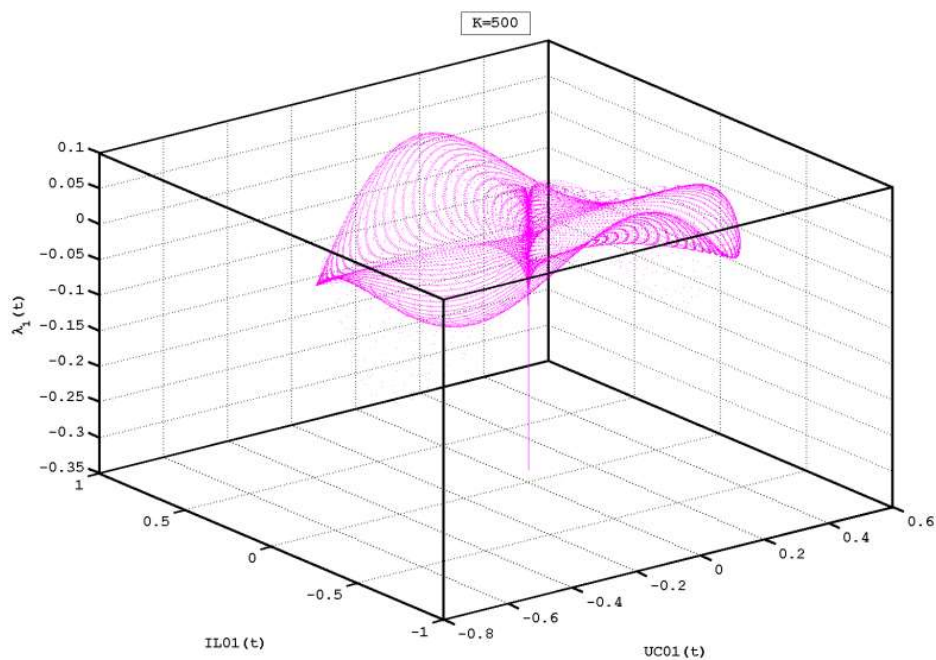


Рисунок 9 – Тривимірний графік $\lambda_1(t)/IL\emptyset 1(t)/UC\emptyset 1(t)$ при значенні $K = 5\emptyset\emptyset$
Figure 9 – Three-dimensional graph of $\lambda_1(t)/IL\emptyset 1(t)/UC\emptyset 1(t)$ for $K = 5\emptyset\emptyset$

У випадку нелінійного режиму спостерігаємо навіть фазу, коли знаки при $\lambda_1(t)$ можуть осцилювати між собою з частотою власних коливань LC -контура, наприклад це область значень $t = 7000 \dots 7500$ сек. (рис. 7).

На рис. 8 та рис. 9 приведені збільшені фрагменти тривимірних графіків залежностей $\lambda_1(t)$ від $IL\emptyset I(t)$ та $UL\emptyset I(t)$. Тобто при лінійному, а також нелінійному режимах роботи, спостерігаємо відмінність у поведінці локальних значень величини $\lambda_1(t)$, що дозволяє якісно розрізнити ці режими.

Слід врахувати, що автори дослідження намагались перш за все дати якісну оцінку процесу, оскільки конкретні значення відповідають тільки певному дослідженню.

Висновки. Досліджується модель суперрегенератора із зовнішнім гасінням. Приведені диференціальні рівняння, що описують роботу моделі. Запропоновано явище суперрегенерації аналізувати з позицій показників Ляпунова.

Встановлено, що як при лінійному, так і нелінійному (логарифмічному) режимах роботи старший глобальний показник Ляпунова є негативним, що з позицій хаотичної динаміки свідчить про відсутність явища динамічного хаосу в системі.

Показано, що значення глобальних показників Ляпунова практично не залежать від режиму роботи суперрегенератора, тобто частоти його гасіння.

В той же час при будь-якому режимі у період зростання коливань на дуже короткий проміжок часу спостерігається “миттєвий локальний хаос”.

Запропоноване одне із визначень явища суперрегенерації як “миттєвий локальний хаос” в системі, що знаходиться під жорстким контролем періодичності.

Вперше науково доведено, що лінійний та нелінійний режими роботи якісно розрізняються між собою за допомогою значень локальних показників Ляпунова $\lambda_1(LOCAL)$.

Перелік посилань

1. Armstrong E.H. Some recent developments in regenerative circuits. PIRE, 1922, №8, 144-260.
2. Leenaerts D.V.W. Chaotic Behavior in Super Regenerative Detectors. IEEE Transactions on Circuits and Systems I-Fundamental Theory and Applications. Vol. 43, №3, March 1996, 169 – 176.
3. Leenaerts D. Integrated Transceiver Design: Non – Linear Dynamic Issues. Proceedings NDES, 2001.
4. Commercon J. – C., Badard R. “Chaos” in Superregenerative Receivers. Chaos, Solitons and Fractals 23, 2005, 1267 – 1274.
5. Артеменко В.А., Петрович В.В. Застосування хаотичного суперрегенератора в задачах моніторингу (Частина 1). – Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. Вип. 114, Частина 1. 2023, – С. 208- 229.
6. Артеменко В.А., Петрович В.В. Застосування хаотичного суперрегенератора в задачах моніторингу (Частина 2). – Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. Вип. 115, Частина 2. 2024, – С. 245- 263.

APPLICATION OF SUPERREGENERATIVE RECEIVERS IN ENVIRONMENTAL STUDIES (MONITORING)

Artemenko Vladuslav A., Master of Ecology, UT5UDJ, e-mail: ut5udj@ukr.net, tel. 380936011250, Kyiv, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0003-0536-5415>

Petrovych Volodymyr V., 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. A nonlinear model describing the operation of a superregenerator with external quenching has been developed.

In order to identify the relationship between the phenomenon of superregeneration and the phenomenon of deterministic chaos, local and global Lyapunov exponent were used. It is classically accepted to judge the presence or absence of deterministic chaos in a dynamic system by the sign of the main global Lyapunov exponent.

The value of the main global Lyapunov exponent during the operation of the superregenerator ALWAYS has a negative value, which indicates the absence of deterministic chaos during the implementation of the superregenerative mode.

But the value of the main local Lyapunov exponent during the operation of the superregenerator for short periods of time still acquires positive values, which indicates outbreaks of local chaos during the implementation of the superregenerative mode.

And the fact that during the operation of the superregenerator the value of the main local Lyapunov exponent for short periods of time still acquires positive values speaks of the deep connection of superregeneration with deterministic chaos.

Also, during the research, we found that in the linear and nonlinear operating modes of the superregenerator, there is a significant difference in the magnitude of the values of the main global Lyapunov exponent, which allows us to clearly distinguish between these modes.

Goal of the work. It is sufficient to study in detail the manifestation of dynamic chaos in the implementation of a superregenerator with external quenching (Both in the linear and nonlinear operating mode of the superregenerator).

Keywords: environment, monitoring, superregenerative receivers, lyapunov exponents, operating modes of the superregenerator.

References

1. Armstrong E.H. Some recent developments in regenerative circuits. PIRE, 1922, №8,-244-260.
2. Leenaerts D.V.W. Chaotic Behavior in Super Regenerative Detectors. IEEE Transactions on Circuits and Systems I-Fundamental Theory and Applications. Vol. 43, №3, March 1996, 169 – 176.
3. Leenaerts D. Integrated Transceiver Design: Non – Linear Dynamic Issues. Proceedings NDES 2001.
4. Commercon J. – C., Badard R. “Chaos” in Superregenerative Receivers. Chaos, Solitons and Fractals, 23, 2005, 1267 – 1274.
5. Artemenko V.A., Petrovych V.V. Zastosuvannya khaotychnoho superreheneratora v zadachakh manitorynha (Chastyna 1). – Avtomobilni dorohy i dorozhnye budivnytstvo. Vyp 114, Chastyna 1. 2023,

– S. 208- 229.

6. Artemenko V.A., Petrovych V.V. Zastosuvannya khaotychnoho superregheneratora v zadachakh manitorynha (Chastyna 1). – Avtomobilni dorohy i dorozhnye budivnytstvo. Vyp 115, Chastyna 2. 2024, – S. 245- 263.