

Київський національний університет імені Тараса Шевченка
Факультет радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем
Кафедра комп'ютерної інженерії

Випускна кваліфікаційна робота
«Дослідження генератору шуму КПП та його математичне моделювання»

Виконав студент 4 курсу
спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія»
Захар Пономаренко

Науковий керівник,
доктор фіз.-мат. наук, професор, зав. кафедри
радіотехніки та радіоелектронних систем
Ігор Анісімов

Рецензент
канд. фіз.-мат. наук, ст. н. с.,
завідувач лабораторії
Володимир Телега

До захисту допускаю

Завідувач кафедри
к.ф.-м.н., доцент
Юрій БОЙКО

Ухвалено на засіданні кафедри “16” червня 2022р., протокол № 18

Київ 2022

Реферат

Дипломна робота: 33 сторінка, 13 рисунків, 4 таблиці, 64 джерела.

Мета роботи - це дослідження генератора шуму КПР, створення та аналіз його математичної моделі та порівняння з теоретичними дослідженнями.

Генератори шуму отримали широке застосування в електроніці. Дослідження генератора КПР дозволить проводити подальші дослідження і обробку моделі з метою отримання нових можливостей у сфері електроніки.

У першому розділі розглянуто основні теоретичні дослідження, проведені викладачами нашого університету.

У другому розділі проведено ряд досліджень математичної моделі за допомогою різних програмних продуктів. Проведено аналіз показників, які впливають на якість одержуваних результатів.

Зміст

Вступ.....	3
1. Огляд літератури з хаотичної динаміки дисипативних систем.....	5
2. Оригінальна частина.	18
Висновки	28
Список літератури	29

Вступ

Динамічний хаос (ДХ) – складний неперіодичний рух, що породжується нестійкими нелінійними системами. Такий тип руху може виникати без зовнішнього шуму і повністю визначається властивостями детермінованої динамічної системи. З моменту відкриття ДХ інтерес до нього в науковому середовищі не слабшає. Це явище активно досліджувалося різними науковими групами. У численних теоретичних та експериментальних роботах було показано, що явище ДХ може бути широко використане у різних галузях науки та техніки.

Одним із перспективних напрямів використання ДХ є його застосування в комунікаційних технологіях. Він має ряд властивостей, які можуть бути корисні при передачі та обробці інформації. Наприклад, використання ДХ дає можливість отримання складних коливань за допомогою простих за структурою пристроїв, при цьому в одному пристрої можна реалізувати велику кількість різних хаотичних мод; управління хаотичними режимами шляхом мінімальних змін параметрів системи. Хаотичні сигнали мають велику інформаційну ємність і дають можливість використовувати різноманітні методи введення інформаційного сигналу в хаотичний.

Найважливішою частиною системи передачі інформації на основі динамічного хаосу є генератор хаотичних коливань. Для реалізації нетрадиційних алгоритмів запису, зберігання, обробки та передачі інформації, що використовують властивості хаотичної динаміки систем, необхідні генератори шуму - пристрої, що перетворюють енергію, взятую від деякого зовнішнього джерела, на енергію хаотичних коливань. Для забезпечення ефективної роботи системи зв'язку генератор хаосу повинен мати певні характеристики. Наприклад, сигнал, що генерується, повинен мати рівномірний спектр потужності в потрібній смузі частот. Тому створення генераторів хаосу із заданими спектральними характеристиками є важливим науково-технічним завданням.

Навіть для найпростішого одноступінчастого смугового генератора шуму немає повної ясності у цьому, які механізми відповідають за формування

спектра. Для успішної розробки генераторів хаосу із заданим спектром необхідно зрозуміти, як відбувається формування спектра потужності сигналу в генераторі, якими параметрами системи визначається форма спектра і які умови повинні виконуватися, щоб сигнал на виході генератора мав спектр потужності максимально наближений до бажаної форми.

У зв'язку з актуальністю цієї теми виникає потреба у детальному вивченні, побудові математичної моделі та практичної реалізації різних генераторів хаотичних сигналів. На сьогодні відомо досить велике число генераторів хаосу, які відрізняються структурою та характеристиками коливань, мають як вакуумну, так і твердотільну реалізації та здатні генерувати хаотичні сигнали від найнижчих частот до оптичного діапазону.

У цій роботі розглядається генератор шуму Кияшка-Піковського-Рабіновича. Проведено математичне моделювання та порівняння його результатів з теоретичними даними.

1. Огляд літератури з хаотичної динаміки дисипативних систем

Значна частина реальних систем (зокрема, практично всі макросистеми) є дисипативними.

Ми спочатку розглянемо загальні властивості хаотичної динаміки в дисипативних системах, а потім розберемо приклад таких систем – генератор шуму Кияшка – Піковського – Рабиновича.

1.1. Загальні властивості хаотичного руху дисипативних систем

На відміну від консервативних систем, для дисипативних систем об'єм фазової краплі з часом змінюється. Він може як зростати, так і зменшуватися, але в середньому з часом він зменшується (це добре видно на прикладі автогенератора, див. рис. 1). В результаті при $t \rightarrow +\infty$ всі зображувальні точки опиняються на деякій підмножині фазового простору з нульовою мірою, яка називається аттрактором. Точніше кажучи, аттрактор – це деяка підмножина B фазового простору, що задовольняє таким умовам:

- вона інваріантна щодо дії оператора потоку, $F_t B = B$;
- існує деякий окіл U , що стискається до B під дією оператора потоку;
- множину B не можна розбити на дві інваріантні підмножини, що не перетинаються.

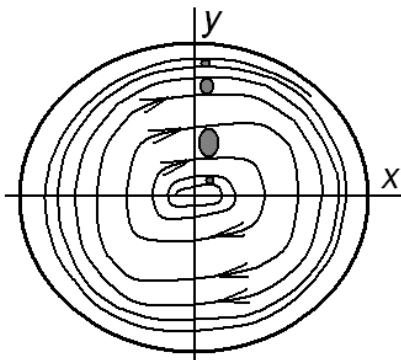


Рис. 1. Зміна об'єму фазової краплі на фазовій площині автогенератора.

Прикладами атракторів на фазовій площині можуть бути стаціонарні точки (стійкий фокус, стійкий вузол) та стійкі граничні цикли.

У фазовому просторі з розмірністю вище трьох, крім стаціонарних точок та граничних циклів, з'являється ще один різновид атракторів – багатовимірні інваріантні тори, що відповідають автоколиванням із кількома некрратними частотами.

Усі згадані типи атракторів називають простими атракторами.

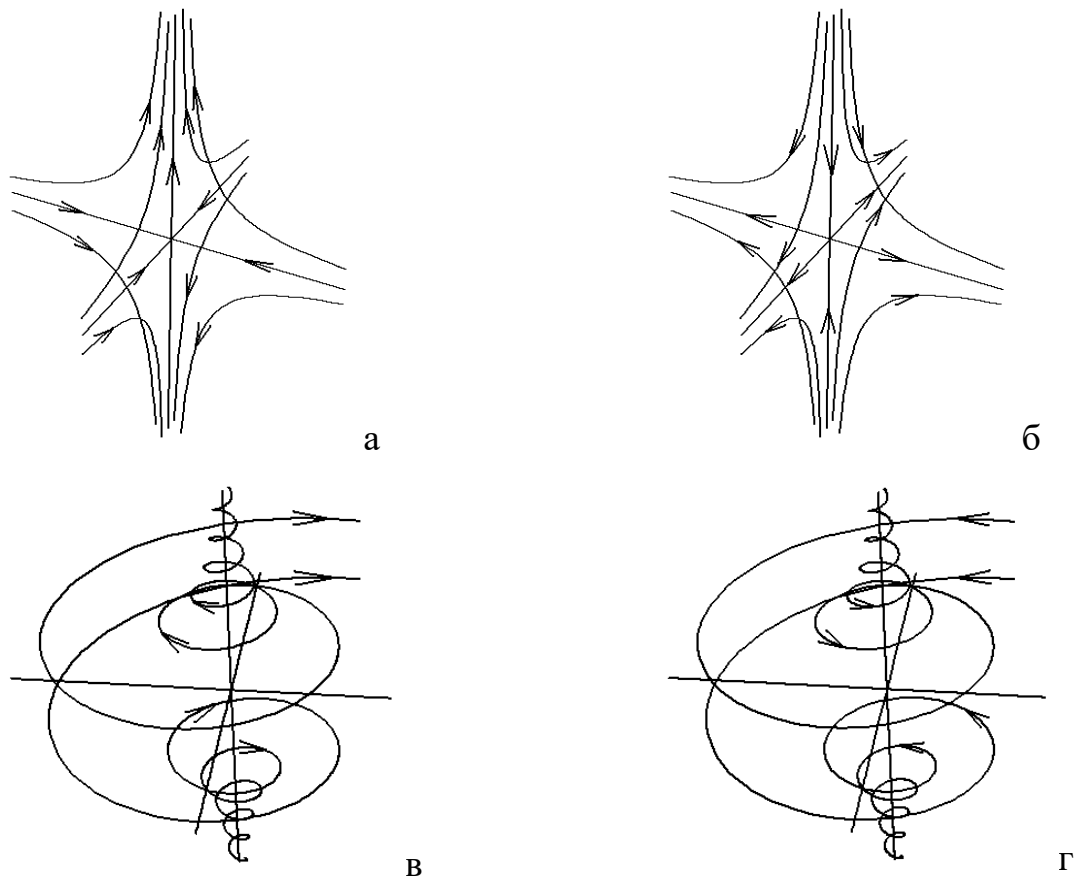


Рис. 2. Особливі точки типу сідло-вузол (а, б) та сідло-фокус (в, г) у тривимірному фазовому просторі.

Крім простих атракторів, у фазовому просторі можуть існувати ще так звані дивні атрактори, які не є ні стаціонарними точками, ні граничними циклами, ні інваріантними торами. Вони поєднують стійкість із нестійкістю. Зображувальні точки з часом притягаються до дивного атрактора, але на самому атракторі сусідні зображувальні точки з часом розбігаються, тобто має місце

нестійкість (щось схоже має місце для стаціонарних точок типу сідло-фокус та сідло-вузол, рис. 2).

Поняття дивного атрактора було запроваджено Д.Рюелем та Ф.Такенсом. Зупинимося на ньому більш детально.

Прості атрактори є підмноговидами фазового простору динамічних систем. Підмноговигляд простору M – це будь-яка підмножина W простору M' (M' включається до M), яка має в кожній точці єдину дотичну гіперплощину, тобто W вкладена в M гладенько. Наприклад, граничний цикл та двовимірний інваріантний тор – це приклади одновимірного та двовимірного підмноговидів.

Але у фазовому просторі дисипативних систем з розмірністю не менше трьох можуть існувати обмежені притягальні множини, що є атракторами, але при цьому не є підмноговидами. Саме такі об'єкти називаються дивними атракторами.

Дивні атрактори мають надзвичайно складну геометричну структуру: вони належать до фракталів і характеризуються нецілою геометричною розмірністю.

Поведінка фазових траєкторій на дивному атракторі аналогічна поведінці гамільтонівських систем із перемішуванням, їй відповідає стохастична динаміка системи. Зокрема, на дивному атракторі можна визначити КС-ентропію та годину перемішування.

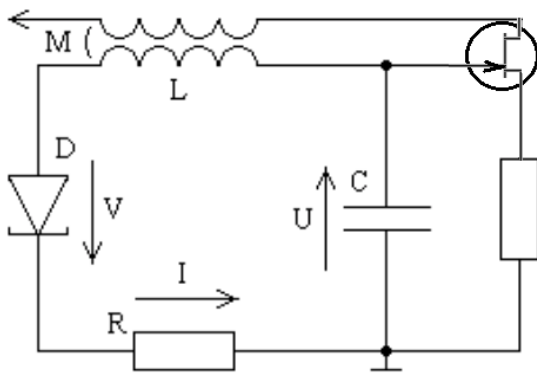
З викладеного вище зрозуміло, що дивні атрактори можуть існувати лише в таких дисипативних системах, які є відкритими.

1.2. Генератор шуму Кияшка – Піковського – Рабиновича

Одним із порівняно простих прикладів реальних дисипативних систем, що здатні демонструвати хаотичну динаміку, є так званий генератор шуму Кияшка – Піковського – Рабиновича (генератор КПП). У цьому пункті ми отримаємо рівняння, що описують роботу даної схеми, опишемо характерні режими її роботи та вигляд дивовижного атрактора.

Схема генератора КПП (рис. 3 а.) нагадує схему звичайного генератора

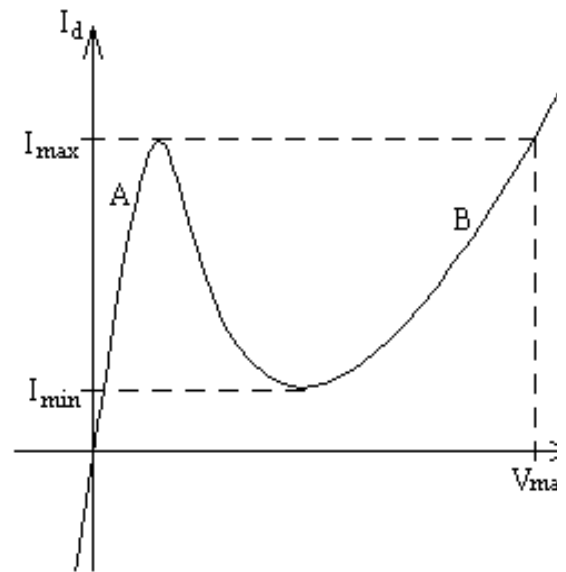
Ван-дер-Поля з контуром у колі сітки, але в цей контур додатково увімкнений тунельний діод з N -подібною вольт-амперною характеристикою $I_d(V)$ (рис. 3 б). Остання має два зростаючі ділянки – A та B , розділені спадною ділянкою (стані, що їй відповідають, є нестійкими і не реалізуються). Омичний опір діода на ділянці A (в області від'ємних та малих позитивних напруг), а також при великих позитивних напругах на ділянці B можна вважати невеликим, на початку ж ділянки B він є значно більшим.



а

Рис. 3: а - схема генератора КПР;

б – вольт-амперна характеристика тунельного діода.



б

Крім тунельного діода, у схемі є ще один нелінійний елемент – лампа (або польовий транзистор) з анодно-сітковою (стік-затворною) характеристикою, яку буде зручно апроксимувати кубічним поліномом:

$$I_A = SU - \frac{SU^3}{3K^2} \quad (1)$$

Складемо систему диференціальних рівнянь, що описує роботу генератора. Позначивши через I струм у коливному контурі, а через U та V – падіння напруги відповідно на конденсаторі та на тунельному діоді (рис. 1.4 а), можна записати другий закон Кірхгофа для контуру (з урахуванням взаємної індукції M та апроксимації у формі

$$L \frac{dI}{dt} + RI - M \frac{d}{dt} \left(SU - \frac{SU^3}{3K^2} \right) + U + V = 0 \quad (2)$$

Диференціюючи рівняння, що пов'язує між собою заряд конденсатора та напругу на ньому, дістанемо:

$$C \frac{dU}{dt} = I \quad (3)$$

Врахуємо, що рп-перехід тунельного діода має деяку ємність C_1 , яку ми вважаємо малою ($\varepsilon \equiv C_1/C \ll 1$). Тому повний струм через цей діод буде складатися із струму провідності $I_d(V)$ та струму зміщення $C_1 dV/dt$:

$$I = I_d(V) + C_1 \frac{dV}{dt} \quad (4)$$

Виключимо похідну dU/dt і перейдемо до безрозмірних змінних:

$$\tau = \omega t, \quad u = \frac{U}{U_\infty}, \quad v = \frac{V}{U_\infty}, \quad i = \frac{\rho I}{U_\infty}, \quad (5)$$

де $\omega^2 = 1/LC$, $\rho^2 = L/C$, $U_\infty^2 = K^2/\omega MS$.

Отримаємо таку систему рівнянь:

$$\frac{di}{d\tau} = (\gamma - u^2)i - v - u, \quad \frac{du}{d\tau} = i, \quad \varepsilon \frac{dv}{d\tau} = i - i_d(v), \quad (6)$$

де використане позначення $\gamma = K^2/U_\infty^2 - R/\rho$.

Система (6) містить три диференціальні рівняння першого порядку з незалежними від часу правими частинами і, отже, описує систему з півтора ступенями вільності.

Ділянки швидкого та повільного руху

Система (6) містить малий параметр ε при похідній в одному з рівнянь, тому її розв'язок можна будувати шляхом виділення ділянок швидкого та повільного руху. Як впливає з останнього рівняння (6), траєкторії повільного руху лежать на поверхні $i = i_d(v)$ (Рис. 1.5 б). Поверхню повільного руху, що відповідає першій зростаючій ділянці залежності $i_d(v)$, називатимемо поверхнею A , а

ту, що відповідає другій зростаючій ділянці – поверхнею B . Поверхня повільного руху, що відповідає спадній ділянці вольт-амперної характеристики діода, є нестійкою. Траєкторії швидкого руху – це прямі, паралельні осі v . Справді, поділивши, наприклад, третє рівняння системи (6) на іншому, приходимо до висновку, що нахил траєкторії швидкого руху dv/du обернено пропорційний малому параметру ε .

Розглянемо повільний рух окремо на поверхнях A та B . Завдяки обраній апроксимації вольт-амперної характеристики діода та малим параметрам ε третє рівняння у системі (1.30) можна замінити на $i = v/r_A$ або $i = v/r_B$ відповідно для кожної з поверхонь. Тоді система (1.30) зводиться до двох рівнянь вигляду

$$\begin{aligned} \frac{d^2u}{dt^2} - (\gamma - r_A - u^2) \frac{du}{dt} + u &= 0, \\ \frac{d^2u}{dt^2} - (\gamma - r_B - u^2) \frac{du}{dt} + u &= 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Отримане рівняння (7) є рівнянням Ван-дер-Поля. Перше з рівнянь описує роботу схеми при $V < V_1$, друге – при $V > V_2$.

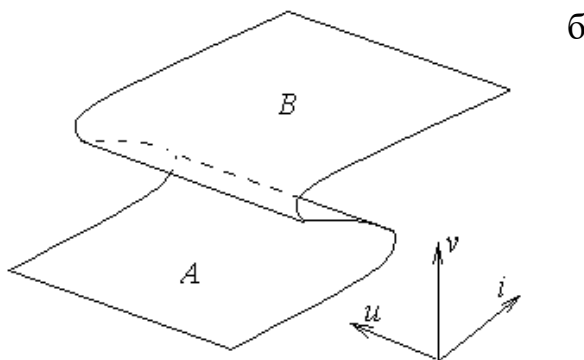


Рис. 4. Поверхня повільного руху

Діаграма характерних режимів роботи генератора КНР в залежності від керувальних параметрів γ та v_1 , побудована на основі числового розв'язку системи (6), подана на рис. 1.6. Якісно такі самі результати можна отримати і при апроксимації вказаної характеристики кубічною параболою.

Цікаво відзначити, що деякі з областей за своєю структурою нагадують фрактали.

Розберемо режими, показані на рис. 5, детальніше.

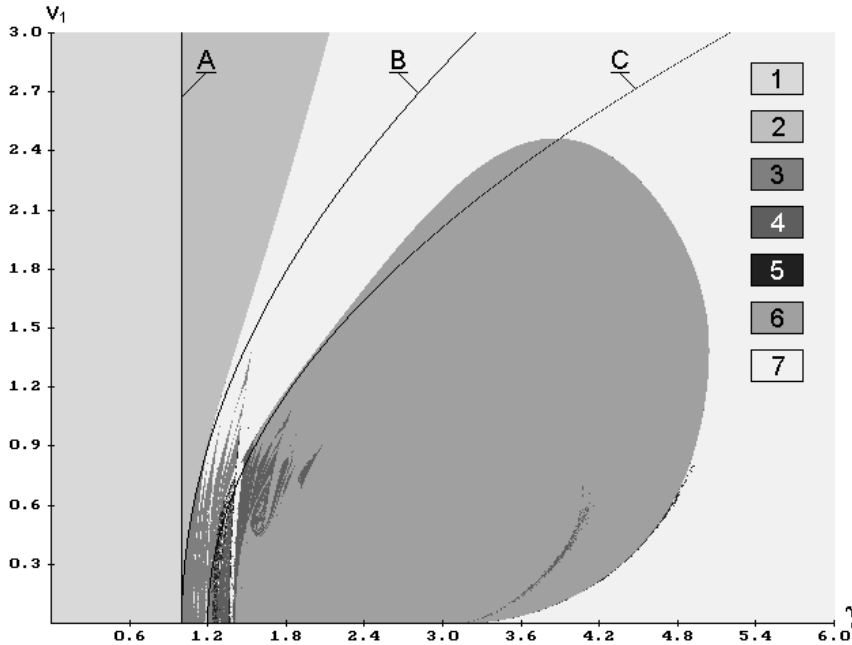


Рис. 5. Діаграма режимів роботи генератора КПР: 1 – згасаючі коливання; 2 – квазігармонічні коливання; 3, 4, 5 – хаотичні режими; 6, 7 – релаксаційні режими.

З першого рівняння (7) видно, що при $\gamma < r_A$ амплітудна умова генерації не виконується, і розв'язкам системи є майже лінійні (при невеликих відхиленнях від положення рівноваги) згасаючі коливання. Їм відповідає область 1 на рис. 5.

При переході γ через критичне значення r_A (Йому відповідає пряма A на рис. 1.6), коли ефективний інкремент коливань з урахуванням омичного опору тунельного діода на ділянці A характеристики діода (рис. 2 б) проходить через нуль, відбувається бифуркація Андронова – Хопфа, тобто самозбудження автогенератора, і в ньому встановлюються незгасаючі квазігармонічні коливання. Їм відповідає область 2 на рис. 1.6. Для випадку $0 < \gamma - r_A \ll 1$ перше рівняння (7) можна розв'язати наближено, застосувавши метод повільних амплітуд. Таким

чином отримаємо розв'язок $u = a(\tau) \cos \tau$, в якому амплітуда змінюється з годиною за законом

$$a(\tau) = \frac{a_\infty}{\sqrt{1 + \left[\left(\frac{a_\infty}{a_0} \right)^2 - 1 \right] \exp[-(\gamma - r_A)\tau]}} , \quad a_\infty = 2\sqrt{\gamma - r_A} , \quad (8)$$

де a_∞ – амплітуда коливань напруги в усталеному режимі.

Зазначимо, що в розглянутих режимах безрозмірна амплітуда струму в колі не повинна перевищувати значення $i_{\max} = v_1/r_A$, тобто діод виступає як звичайний лінійний резистор.

Фазовий портрет генератора КПР у режимах 1 та 2 подано відповідно на рис. 6 а та 6 б.

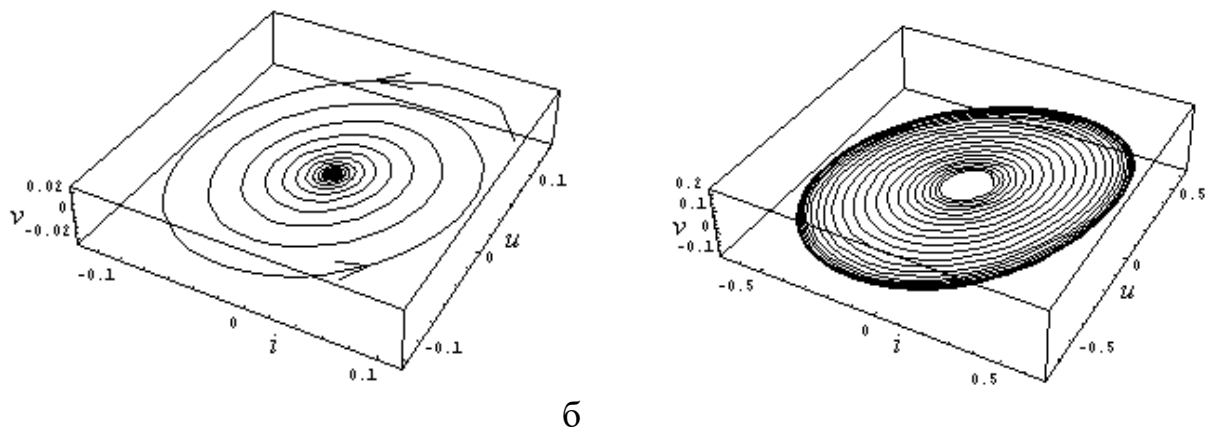


Рис. 6 Фазовий портрет генератора КПР у режимах згасаючих (а) та квазігармонічних (б) колінь. Фазові траєкторії лежать на ділянці А поверхні повільного руху

При подальшому збільшенні γ , коли втомлена амплітуда (1.41) перевищує значення $i_{\max} = v_1/r_A$, тобто при

$$2\sqrt{\gamma - r_A} > \frac{v_1}{r_A} \quad (9)$$

(умові (1.42) відповідає перехід через криву B на рис. 1.6), коливання змінюють форму та набувають хаотичного характеру.

Справді, при переході струму через значення i_{\max} відбувається стрибок з

однієї зростаючої ділянки вольт-амперної характеристики тунельного діода (низькоомної) на іншу (високоомну). На фазовому портреті спостерігається відповідний стрибок між поверхнями повільного руху. A та B . При цьому омічний опір тунельного діода різко зростає (при тому самому значенні струму зростає падіння напруги на діоді), що призводить до аперіодичного згасання колінь у контурі. Після зменшення струму до значення $i_{\min} = 2v_1 / (r_A + r_B)$ (розмірне I_{\min} на рис.1.5 а) відбувається зворотній стрибок між поверхнями A і B .

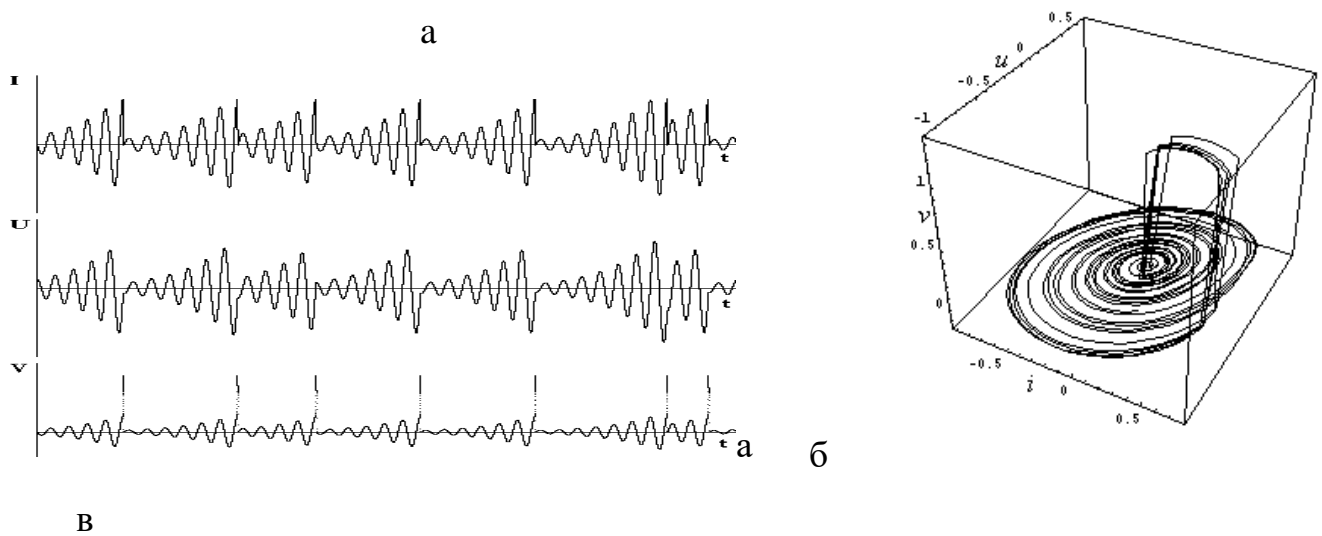


Рис. 7. Мономодальний режим стохастичних коливань: а – епюри напруг та струмів; б – фазовий портрет; в – діаграма Ламерея.

Оскільки ймовірність потрапити на попередню фазову траєкторію практично відсутня, зростання коливань починається з новими амплітудою та фазою. Таким чином, саме немонотонність вольт-амперної характеристики тунель-

льного діода та наявність у нього малої ємності разом із нестійкістю, обумовленою позитивною зворотною зв'язкою, призводить до стохастизації коливань.

У процесі моделювання було виявлено три якісно різні режими стохастичних коливань. Перший їх - це режим, описаний у [1-3] (режим 3 на рис.1.6). При цьому залежності струму та напруги з часом являють собою випадкові послідовності радіоімпульсів з експоненціальною обвідною (рис. 7 а). Видно, що величини i та u змінюються з часом неперервно, а величина v зазнає стрибків, що узгоджується з висловленими вище якісними міркуваннями.

Фазовий портрет цього режиму показано на рис. 7 б. Фазова траєкторія на рис. 7 б є дивним атрактором, який має характерну фрактальну структуру. Фрактальна розмірність цього атрактора лежить, очевидно, в межах від одиниці до двійки. Область нестійкості на дивному атракторі припадає на ділянку A поверхні повільного руху.

Стрибки між поверхнями повільного руху призводять до формування максимумів і різких спадів на діаграмі Ламерея для точкового відображення. Для режиму 3 діаграма Ламерея показано на рис. 1.8 ст. Вона має один різкий максимум. Відображення такого типу називають моноmodalьним. Такий режим хаотичних коливань можна описати за допомогою моноmodalьного відображення, тому відповідний режим стохастичних коливань генератора КІР можна назвати моноmodalьним.

Саме моноmodalьний режим було експериментально та теоретично досліджено у роботах Кияшка, Піковського та Рабиновича.

Опишемо тепер, як побудувати точкове відображення для моноmodalьного режиму, показане на рис. 7 в. Для того, щоб побудувати ту частину відображення, яка описує рух на поверхні A (рис. б), скористаємося першим з рівнянь (б), в якому знехтуємо нелінійним доданком (це справедливо, якщо на межі ділянки A поверхні повільного руху амплітуда коливань значно менша від того встановленого значення, яке визначається нелінійністю лампи або польового транзистора). У цьому приближенні зазначене рівняння описує коливання з безрозмірною частотою $\omega = 1$, амплітуда яких зростає з безрозмірним часовим

інкрементом $(\gamma - r_A)/2$. Тоді зв'язок між амплітудами напруги u у сусідніх точках перетину додатної півосі u (тобто через період коливань частоти $\omega = 1$, див. рис.

8 а) буде визначатися співвідношенням $u_{n+1} = \varphi_1(u_n) = ku_n$, де $k = \exp[\pi(\gamma - r_A)] > 1$.

Це співвідношення залишається справедливим при $u_0 - \sqrt{(k-1)u_0} < u_n < u_0$, де $u_0 = i_{\max}/k$.

Інша ділянка відображення відповідає випадку, коли зображувальна точка зістрибує з ділянки A поверхні повільного руху на ділянку B , рухається по ній, а потім стрибком повертається на ділянку A (Рис. 8 б). Як видно з рис. 8 б, у цьому випадку повинна відповідати спадна ділянка відображення. Її можна апроксимувати ділянкою квадратної параболі вигляду $u_{n+1} = \varphi_2(u_n) = u_0 - \sqrt{u_n - u_0}$. Це відображення справедливе за $u_0 < u_n < ku_0$.

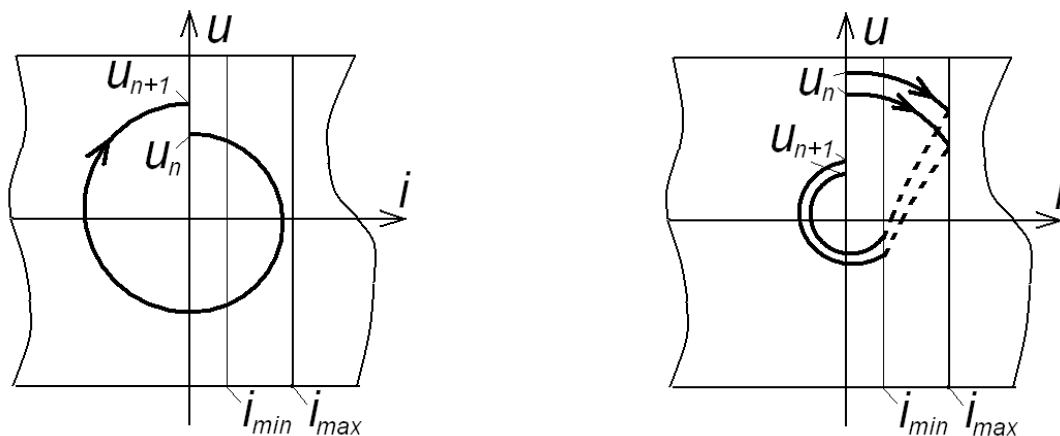


Рис. 8. До побудови відображення для моноmodalного режиму стохастичних колінь. Показано поверхню повільного руху з боку негативної частини осі v та відрізки фазових траєкторій на ній.

Побудовані таким чином відображення φ носити модельний характер. Однак воно є якісно правильним, що підтверджують числові розрахунки.

Відображення φ_1 є розтягальним, $|d\varphi_1/du_n| = k > 1$. Відображення φ_2 є розтягальним там, де $u_n < u_0 + 1/2$ (якщо $(k-1)u_0 < 1/2$, то відображення φ_2 є розтягальним на

всій робочій ділянці). Крім того, сумарне відображення φ є обмеженим (воно перетворює відрізок $[u_0 - \sqrt{(k-1)u_0}, ku_0]$ сам у собі) і немонотонним. Отже, досліджувана система демонструватиме хаотичну динаміку.

З точки зору відображення Пуанкаре, число максимумів, або, що саме, число періодів коливань в одному радіоімпульсі (див. рис. 7 а) – це число ітерацій відображення на відрізку $\square \square \square$

Розіб'ємо відрізок $[u_0 - \sqrt{(k-1)u_0}, ku_0]$ на ділянки d_i та Δ_i (Рис. 9 а). Будемо цікавитися не координатами точки u_n , а лише номером ділянки, на яку вона потрапляє. Кожній траєкторії при цьому відповідатиме певна послідовність ділянок.

Для визначення статистики сигналу потрібно знати ймовірність переходу з однієї ділянки в іншу. У цьому ймовірність переходів визначається такими правилами:

- якщо з ділянки можливий лише один перехід, то його ймовірність дорівнює одиниці; це стосується переходів, які починаються зі всіх ділянок, крім d_1 ;
- з ділянки d_1 можливі різні переходи; приймемо, що ймовірності переходів $d_1 \rightarrow \Delta_i$ пропорційна довжинам відрізків Δ_i , які, у свою чергу, пропорційні довжинам відрізків d_i , тобто величини $1/k^i$.

Схему переходів між відрізками показано на рис. 9 б. З неї видно, що ймовірність $P(n)$ того, що радіоімпульс міститиме n періодів колін, пропорційна ймовірності потрапляння з ділянки d_1 на ділянку Δ_n , тобто величини $1/k^n$. Точніше,

$$P(n) = \frac{f(n)}{k^n}, \quad (10)$$

де повільна залежність $f(n)$ визначається обраною апроксимацією φ_2 та умовою нормування. Ця формула задовільно описує статистику реального ге-

нератора КПР.

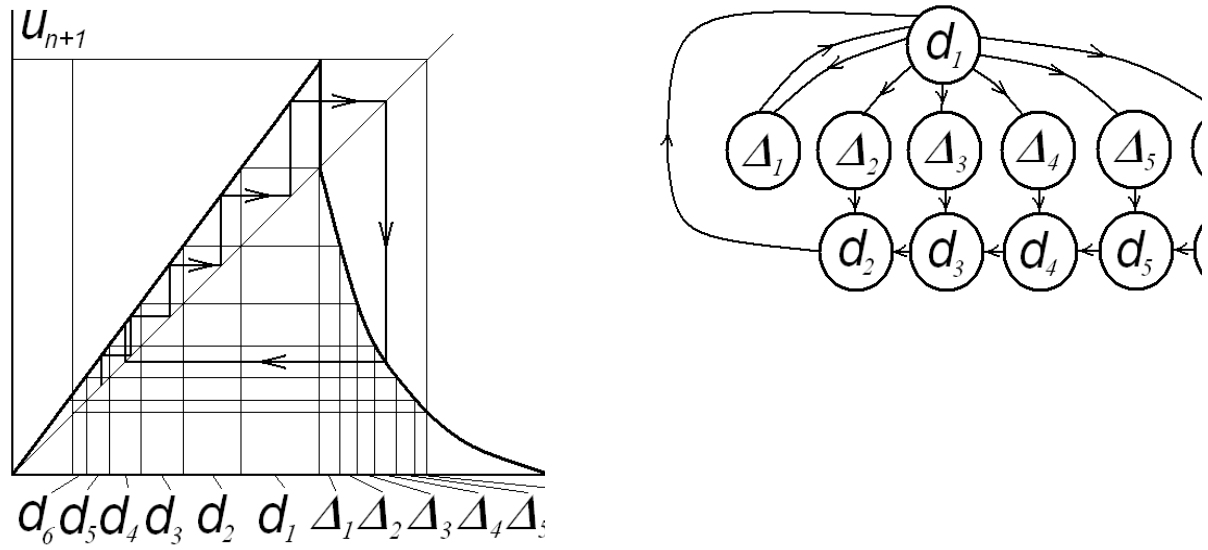


Рис. 9. До побудови статистики генератора КПР у мономодальному режимі: а – сходи Ламерея і розбивка осі абсцис на ділянки; б – схема можливих переходів між ділянками.

2. Оригінальна частина.

Для чисельного рішення системи 6 було використано програмне забезпечення Wolfram Mathematica. Систему було розв'язано командою NDSolve.

```
In[124]= s = NDSolve[{i'[t] == (0.62 - u[t]^2) i[t] - v[t] - u[t], u'[t] == i[t],  
[численно решить ДУ  
v'[t] == 1000 (i[t] + ((v[t] - 1.18) - (v[t] - 1.18)^3 - 0.43)), i[0] == u[0] == v[0] == 0.01}, {i, u, v}, {t, 3000},  
AccuracyGoal -> 10, PrecisionGoal -> 10]  
[требуемая абсол. точн... [целевая относительная точность
```

На рис. 3.а зображена залежність напруги та струму від часу. Бачимо, що ця система являє собою послідовність окремих імпульсів, довжина яких послідовно змінюється. Методом підбору коефіцієнтів у системі рівнянь (6) вдалося отримати схожу залежність напруги від часу (рис. 10). Можна побачити, що пакки коливань такого сигналу містить різну кількість півперіодів.

```
In[127]= Plot[Evaluate[u[t] /. s], {t, 0, 300}, PlotPoints -> 200]  
[гра... [вычислить [начальное число точек
```

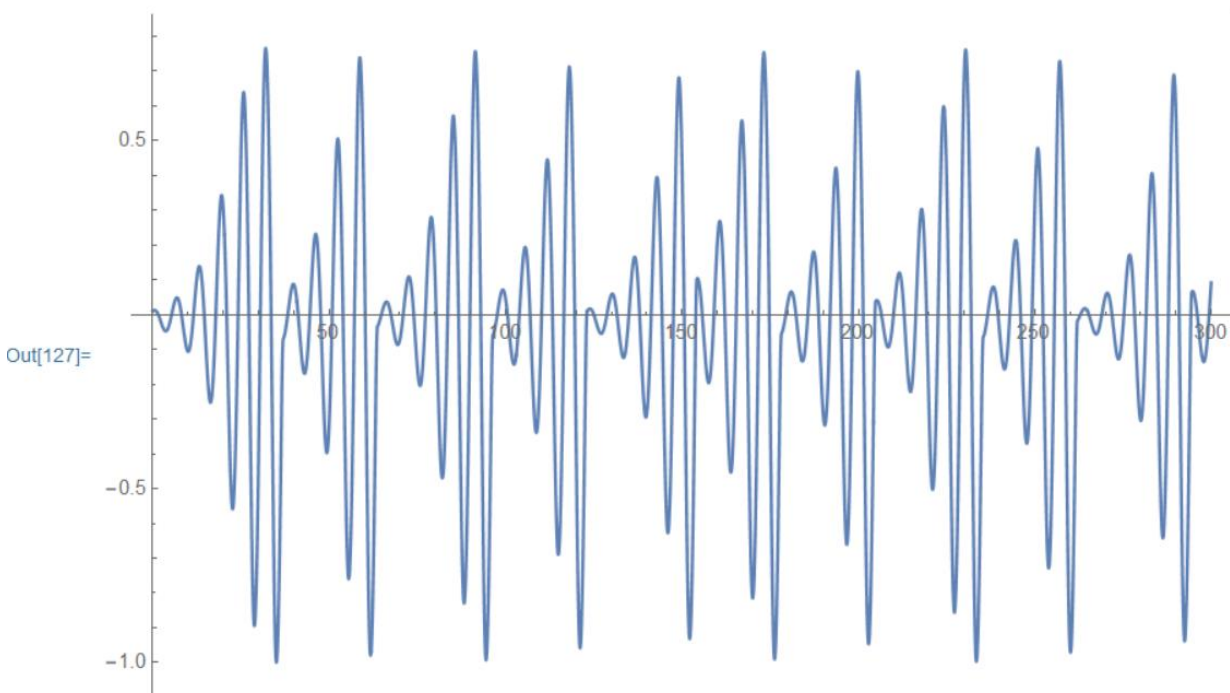


Рис. 10. Залежність напруги на ємності в генераторі КГР від безрозмірного часу на проміжку 0-300.

Розглянемо і дослідимо 100 пачок таких імпульсів, щоб з'ясувати ймовір-

ність появи імпульсу із заданою кількістю періодів синусоїди та порівняти результати з аналітичною теорією Піковського-Рабіновича. На проміжку від [0; 300] вміщуються 10 таких пачок, тому повторимо цей процес 10 разів здвигаючи проміжок на 300. Фрагменти отриманої залежності на різних проміжках часу подані на рис. 10-11.

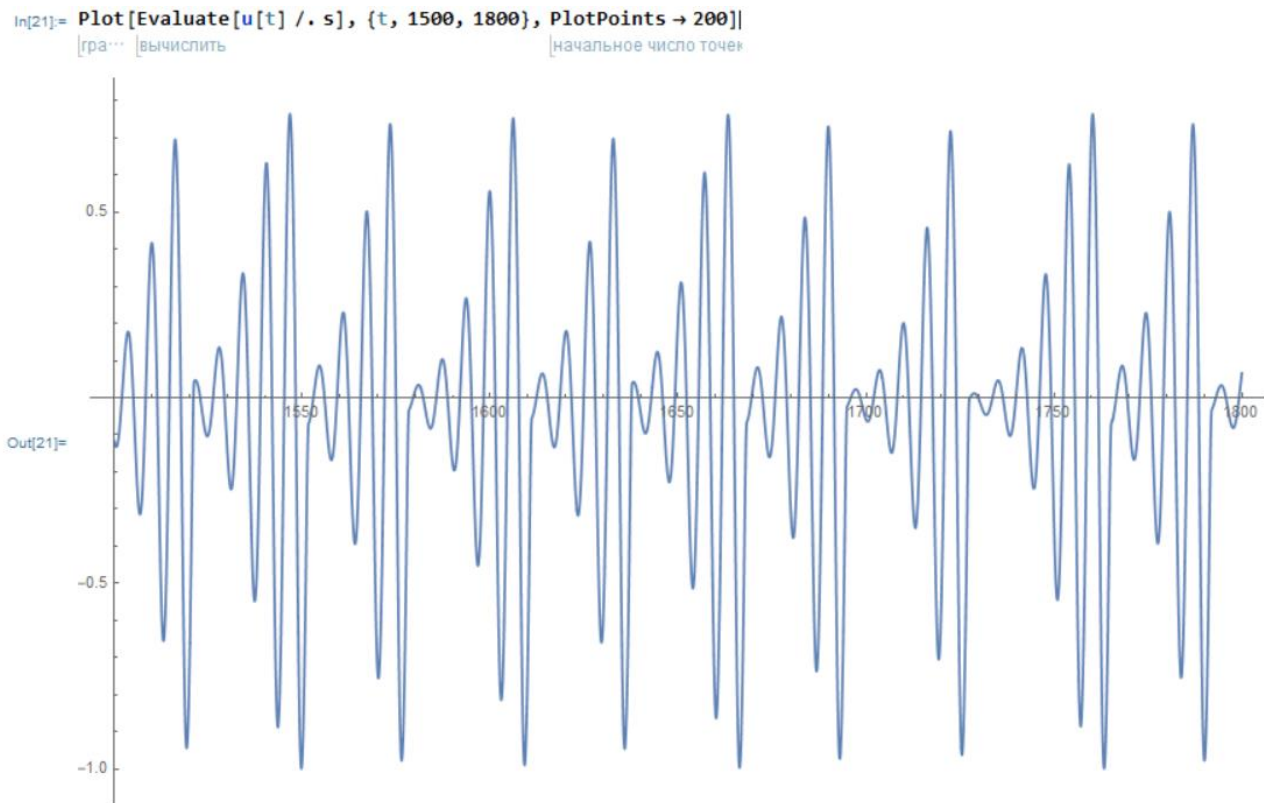


Рис. 11. Залежність напруги на ємності в генераторі КПП від безрозмірного часу на проміжку 1500-1800.

Отриманні дані занесемо в таблицю 1.

Таблиця 1. Кількість періодів синусоїди в пачці в залежності від її номера

Порядок пачки імпульсу	Кількість півперіодів синусоїди
1	6
2	4
3	5

4	4
5	5
6	4
7	4
8	5
9	4
10	5
11	4
12	5
13	4
14	5
15	5
16	4
17	5
18	4
19	6
20	4
21	4
22	5
23	4
24	4
25	6
26	4
27	5
28	4
29	6
30	4
31	5
32	4

33	5
34	4
35	4
36	5
37	4
38	5
39	5
40	5
41	5
42	5
43	4
44	5
45	5
46	5
47	5
48	5
49	5
50	5
51	4
52	5
53	4
54	5
55	4
56	5
57	4
58	5
59	6
60	4
61	5

62	4
63	5
64	4
65	5
66	5
67	4
68	5
69	4
70	5
71	5
72	5
73	5
74	4
75	5
76	4
77	5
78	4
79	6
80	4
81	6
82	4
83	5
84	4
85	5
86	4
87	5
88	5
89	4
90	5

91	4
92	5
93	4
94	5
95	4
96	5
97	4
98	5
99	4
100	5

Розрахуємо данні з попередньої таблиці за допомогою функції пошуку повторів в Excel і проведемо невеликий аналіз статистичних даних.

=СЧЁТЕСЛИ(A1:A102; 4)							
D	E	F	G	H	I	J	K
41	Частота						7
52							52
7							41

=СЧЁТЕСЛИ(A1:A101; 5)							
D	E	F	G	H	I	J	K
41	Частота						7
52							52

=СЧЁТЕСЛИ(A1:A100; 6)							
D	E	F	G	H	I	J	K
41	Частота						7
52							52
7							41

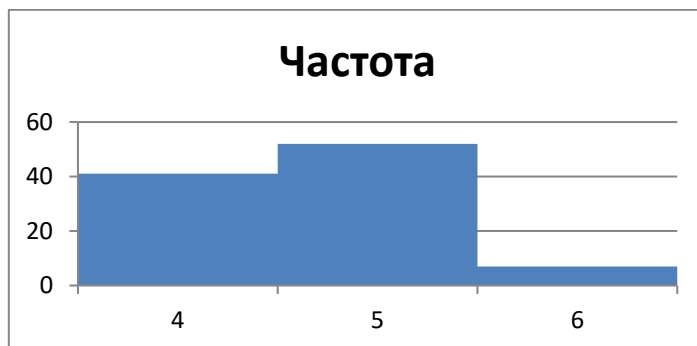
Заведемо отримані данні в таблицю 2 для розрахунку показників.

Таблиця 2. Статистика кількості імпульси у пачках

x_i	Кількість, f_i	Відносна частота, f_i/f
4	41	0.41
5	52	0.52
6	7	0.07
Разом	100	1

Потім за допомогою функції «Гістограма» в Excel побудуємо зведений графік

співвідношення частот. Отримані данні занесемо на малюнок.



Тепер порівняємо результати розрахунків з аналітичною теорією Піковського – Рабіновича (див. формулу (10)).

Кожний імпульс являє собою коливання амплітуд, котрі експоненціально зростають. Величина K , яка входить до формули (10) – це відношення амплітуд двох сусідніх періодів синусоїди. Виходячи із того, що ця амплітуда зростає експоненціально, можна взяти дві любых пари i і порахувати значення K . Для

більш точних розрахунків візьмемо 5 пар із різних пачок та знайдемо середнє К (рис. 12). Данні з якими будемо працювати занесемо в таблицю 3.

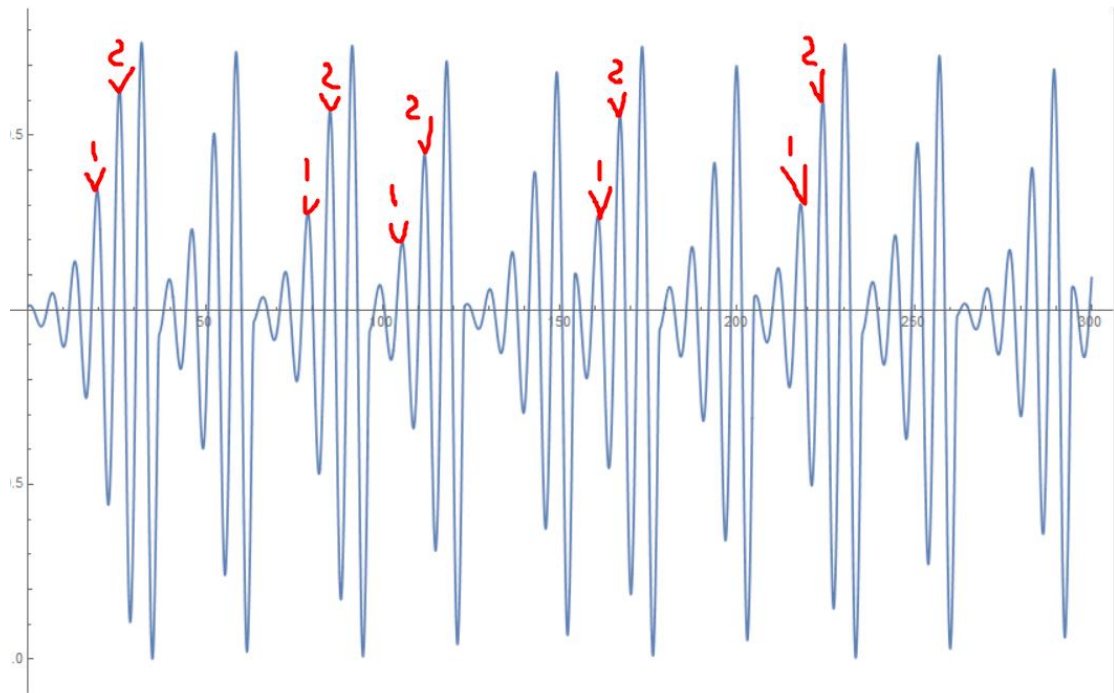


Рис. 12. До визначення параметра К

Таблиця 3. Визначення параметра К

Амплітуда 1	0.32	0.3	0.19	0.26	0.29	Середнє значення К
Амплітуда 2	0.62	0.58	0.44	0.55	0.6	
К(2/1)	1.93	1.93	2.31	2.11	2.06	2.07

Шляхом ділення рядка 2 на рядок 1 ми отримали рядок 3, це і є шукане К.

A3						
=A2/A1						
	A	B	C	D	E	F
1	0,32	0,3	0,19	0,26	0,29	
2	0,62	0,58	0,44	0,55	0,6	ср знач
3	1,94	1,93	2,32	2,12	2,07	2,07

З урахуванням відмінностей між отриманими даними, розрахуємо середнє значення отриманого коефіцієнту К. Скористаємося формулою **СРЗНАЧ** в Excel.

	A	B	C	D	E	F
1	0,32	0,3	0,19	0,26	0,29	
2	0,62	0,58	0,44	0,55	0,6	ср знач
3	1,94	1,93	2,32	2,12	2,07	2,07

В оглядовій частині сказано, що ймовірність $P(n)$ того, що радіоімпульс міститиме n періодів колінь, пропорційна ймовірності потрапляння з ділянки d_1 на ділянку Δ_n , тобто величині $1/k^n$, якщо знехтувати повільною залежністю $f(n)$, що визначається обраною апроксимацією φ_2 та умовою нормування. Ця формула має описувати статистику реального генератора КПР.

$$P(n) = \frac{f(n)}{k^n},$$

Перевіримо це на наших даних. У нас є 4, 5 або 6 півперіодів у пачці, тому умова нормування буде мати такий вигляд:

$$\frac{f}{k^4} + \frac{f}{k^5} + \frac{f}{k^6} = 1$$

Величина k нам вже відома, тому з цієї умови легко можна знайти f .

$$\frac{f}{2.07^4} + \frac{f}{2.07^5} + \frac{f}{2.07^6} = 1$$

$$f = 10.79$$

$$P(4) = 10.79/2.07^4 = 0.58$$

$$P(5) = 10.79/2.07^5 = 0.28$$

$$P(6) = 10.79/2.07^6 = 0.13$$

Отримані данні занесемо до таблиці 4 та порівняємо з даними, отриманими в моделюванні.

Таблиця 4. Порівняння результатів аналітичної теорії та моделювання

n	P(n) розрахункове	P(n) змодельоване
4	0.58	0.41
5	0.28	0.52
6	0.13	0.07

За допомогою функції «Гістограма» в Ексел побудуємо графік (лівий). Отримані данні занесемо на малюнок та порівняємо з попереднім (правий), побудованим на основі моделювання.

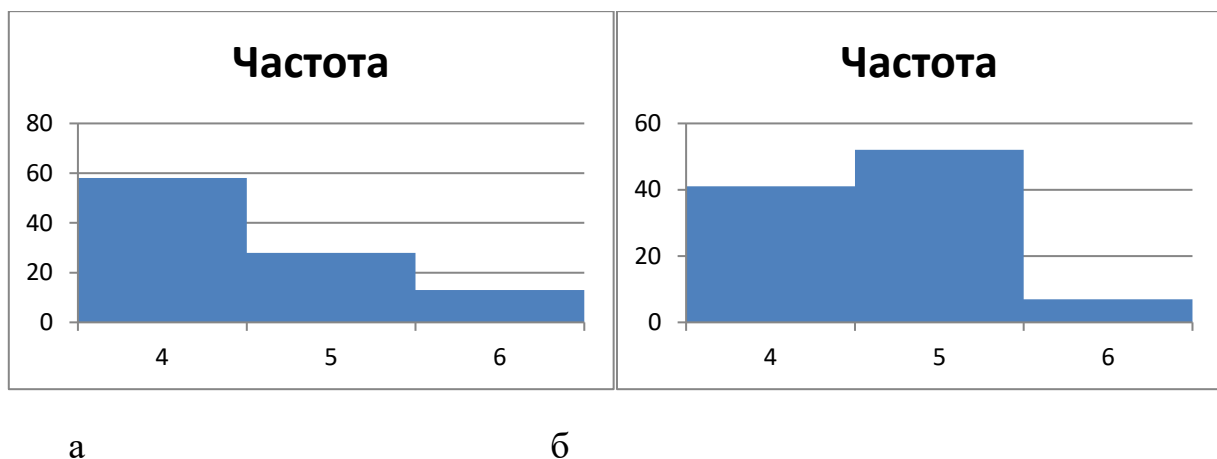


Рис. 13. Ймовірність появи імпульсу із заданим числом періодів: а – аналітична теорія, б – комп'ютерне моделювання

Видно, що теорія Піковського – Рабіновича не відповідає результатам моделювання. Можливо, отримана розбіжність пов'язана припущенням про сталість величини f , тоді як насправді залежність $f(n)$ є суттєвою.

Висновки

1. Шляхом числового розв'язання системи диференціальних рівнянь, які описують генератор КНР, отримано часову залежність напруги на ємності схеми.

2. Проаналізовано статистику кількості півперіодів синусоїди в пачках.

3. Показано, що ця статистика не описується спрощеною теорією Піковського – Рабіновича. Можна припустити, що це пов'язано з нехтуванням залежністю $f(n)$

Список літератури

1. Піковський А.С., Рабінович М.І. Простий автогенератор зі стохастичною поведінкою. / Піковський А.С., Рабінович М.І // ДАН СРСР.-1978.-т.23.- №2.-С. 301-304.
2. Кияшка С.В., Піковський А.С., Рабінович М.І. Автогенератор радіодіапазону зі стохастичним поведінкою./ Кияшко С.В., Піковський А.С., Рабінович М.І.// Радіотехніка та електроніка.- 1980.- т.25.- №2.-С. 336-343.
3. Заславський Г.М. Стохастичність динамічних систем. / Заславський Г.М.// М.Наука.- 1984.- С. 271.
4. Дмитрієв А.С., Кислов В.Я., Старков С.О. Експериментальне дослідження освіти та взаємодії дивних атракторів у кільцевих автогенераторах. //ЖТФ.-1985.-т.55. - №12.- С. 2417-2419.
5. Ott E. Chaos в Dynamical Systems./ Ott E Cambridg Yniversity Press. // 1993.-С.385.
6. Аніщенко В.С. Атрактори динамічних систем. /. Аніщенко В.С. // Изв.вуз, Прикладна нелінійна динаміка.- 1997.- т.5.-№1.-С. 109-127.
7. Кузнєцов С.П. Динамічний хаос. / Кузнєцов С.П. // ФМ.- М. - Фізматгіз.-2006.-С.355.
8. Перевізників О.М. Критерій сталості нелінійних систем. /Перевозніков Є.Н.// Изв.Вузов, фізика.-2013 - №56.-С. 151-154.
9. Скворцов Г.Є., Перевозніков Є.М. Сингулярно-динамічні критерії нестійкості та хаосу. / Скворцов Г.Є., Перевозніков Є.М. //Міжнародний науково-дослідний журнал, фізико-математичні науки. - №9.-ч.3.-С.91-93.
10. Перевозніков, О. Міхайлова. Neutrality Criteria for Stability Analysis of Dynamical Systems через Lorentz and Rossler Model Problems. / Е. Перевозніков, О. Міхайлова. //Journal of Applied Mathematics and Physics-2015.- №5.-С. 569-576.

11. Скворцов Г.Є., Перевозніков Є.М. Теорія нестійкості та критерії хаосу / Скворцов Г.Є., Перевозніков Є.М.// Міжнародний науково-дослідний журнал, фізико-математичні науки. - 2016. - №7. - ч.4.
12. Бобровніков л.з. Радіотехніка та електроніка; Підручник для вузів. - М.; Надра, 1990. – 374с.; з іл.
13. Гутніков В. С.інтегральна електроніка у вимірювальних пристроях. - Л; Енергоатомвідів. Ленінградське відділення, 1988. –304 с.; іл.
14. Терещук Р.М. та ін. напівпровідникові приймально-підсилювальні пристрої; довідник радіоаматора – Київ; наук. думка. 1989. – 800 с.; іл.
15. Четвертков О.Р., Дубровський С. С., Іванов О. В. "Резистори": довідник, Москва 1991р.
16. Аксьонов А. І., Нефьодов А. В. "Резистори. Конденсатори": Довідковий посібник, Москва 2000р.
17. Аксьонов А.і., Нефьодов а. в. "вітчизняні напівпровідникові прилади": Довідковий посібник, Москва 2000р.
18. Бондарь В.А. "Генератор лінійно - змінюється напруги", 1988р.
19. Гусєв В.М., Гусєв Ю.М. "Електроніка": Навчальний посібник для вузів, Москва 1982.
20. Гершунський Б. С. "Довідник із розрахунку електронних схем", Київ 1983.
21. Хоровіц П., Хілл у. "Мистецтво схемотехніки": Москва 2001р.
22. Хоровіц П., Хілл у. Мистецтво схемотехніки. Т. 1. М: Мир, 1986.
23. Бузов м. Захист від витоку інформації ТЕХНІЧНИМИ каналами. Навчальний посібник. М: Гаряча лінія-Телеком, 2005.
24. Шкрітек П. Довідкове керівництво по звуковій схемотехніці. М: Світ, 1991.
25. Михайлівський А. Г. Стабілізатори напруги у приладах фізичного експерименту. Пермь, 1988.
26. Михайлівський А. Г. Випрямлячі у приладах фізичного експерименту. Пермь, 1988.

27. Базовий принцип конструювання РЕА/під ред. є. м.Парфьонова.- М.: радіо і зв'язок, 1981.
28. Поляков К. П. конструювання приладів та пристроїв радіоелектронної апаратури. – М.: радіо і зв'язок, 1982.
29. Довідник з конструювання радіоелектронної апаратури (друковані вузли)/а.і. горобець, л. і. Степаненко, В. М. Коронкевич. - Київ: Техніка, 1985.
30. Парфенів є.м. та ін. Проектування конструкцій радіоелектронної апаратури: Навч. посібник для вузів. – М.: радіо і зв'язок, 1989.
31. Розробка та оформлення конструкторської документації РЕА: довідник. Під ред. Є. Т.Романічової. - 2-е вид., перероб. і дод. – М.: радіо і зв'язок, 1989.
32. Електронна Довідкова книга радіоаматора-конструктора: у 2-х книгах. Кн.2/ Р.Г.Варламов, В.Я. Замятін, Л. М. Капчинський та ін.; Під ред. Н. і. Чистякова. - 2-ге вид., довід. І дод. – М.: радіо і зв'язок, 2001.
33. Метрейкін Н.А., Озерський О. і. надійність і випробування радіодеталей і РАДІОКОМПОНЕНТІВ: Підручник для технікумів. – М.: радіо і зв'язок, 1981. – 272с., Іл.
34. Переверзєв, Л.А. вимірювання спектральної щільності імпульсів / Л. А. Переверзєв. - Москва: РДГУ, 2016. - 160 с.
35. Петухов, В.М. транзистори та їх зарубіжні аналоги. У 4 томах. Том 4/В. М. Петухов. - М: РадіоСофт, 2004. - 544 с.
36. Піменов, О.І. механізми Налаштування РЕА/А. і. Піменів. - М: Вища школа, 1977. - 224 с.
37. Напівпровідникові прилади та їх застосування. Складання статей. Випуск 3. – М.: Радянське радіо, 1998. – 350 с.
38. Овсянніков, Н.і. кремнієві біполярні транзистори/Н.І. Овсянніков. - М: Вища школа, 1989. - 304 с.
39. Моделі інформаційного конфлікту засобів пошуку та виявлення. – М.: Радіотехніка, 2013. – 232 с.

40. Мігулін, і. Н. інтегральні мікросхеми у радіоелектронних пристроях / і.М. Мігулін, м. з. Чаповський. - Москва: Наука, 1985. - 208 с.
41. Шеїн, А.Б. методи проектування електронних пристроїв/О.Б. Шеїн, Н. М. Лазарева. – М.: Інфра-Інженерія, 2011. – 456 с.
42. Базові лекції з електроніки. У 2 томах. Том 2. Твердотільна електроніка. – М.: Техносфера, 2009. – 608 с.
43. Белов, і.Ф. Довідник з транзисторних радіоприймачів, радіолам та електрофонів (комплект з 2 книг) / і. Ф. Белов, є. в. Дризго. – М.: Радянське радіо, 1976. – 650 с.
44. Білоус, О.І. Напівпровідникова силова електроніка / А. і. Білоус, С. а. Єфіменко, О. С. Турцевич. – М.: Техносфера, 2014. – 228 с.
45. Блантер, с. Радіотехніка та електроніка / с.Блантер. - Москва: Вища школа, 2005. - 416 с.
46. Бонч-Бруєвич, А.М. Радіоелектроніка в експериментальній фізиці/а. м. Бонч-Бруєвич. – Москва: РДГУ, 2016. – 768 с.
47. Брянський, Л. Н. Радіовимірювання. Метод. Достатки. Похибки/Л.М. Брянський, М. М. Левін, В. Я. Розенберг. – М.: Видавництво комітету стандартів, мір та вимірювальних приладів при Раді Міністрів СРСР, 2009. – 336 с.
48. Вайнштейн, Л.А. лекції з надвисокочастотної електроніки / Л. А. Вайнштейн, В. А. Сонцов. - Москва: РДГУ, 1984. - 720 с.
49. Варганесян, В.А. радіоелектронна розвідка/В. А. Варганесян. – М: Воєніздат, 1975. – 256 с.
50. Галкін, ст. і.напівпровідникові підсилювальні пристрої. Довідник/В.І. Галкін, О. Л. Булічов, П. М. Лямін. - Москва: СПб. [та ін.]: Пітер, 1994. – 352 с.
51. Давидов, П.С. Технічна діагностика радіоелектронних пристроїв та систем / П. С. Давидов. – М.: радіо і зв'язок, 1988. – 256 с.
52. Жеребців, і.п. основи електроніки/і. п. Жеребців. – Москва: Машинобудування, 1996. – 416 с.

53. Жигальський, Геннадій Павлович флуктуації та шуми в електронних твердотільних приладах / Жигальський Геннадій Павлович. – М.: ФІЗМАТЛІТ, 2012. – 131 с.
54. Каценеленбаум, б. з. Високочастотна електродинаміка. Основи математичного апарату/б.з. Каценеленбаум. – М.: Головна редакція фізико-математичної літератури видавництва "Наука", 1997. – 240 с.
55. Кашкаров, Андрій оригінальні конструкції для радіоаматорів / Андрій Кашкаров. - М: АВТОР, 1997. - 865 с.
56. Глінський В. В., Іонін ст. м. Статистичний аналіз. Навчальний посібник. Вид. 2, М. Філін'. 1998.
57. Годін О. М.. «Статистика». М. "Дашков і К0", 2002р.
58. Єдронова в. Н., М. В. Малафєєва Загальна теорія статистики: Підручник. 2-е вид., перероб. і дод. - м: Магістр, 2009
59. Єфімова М. Р. «Статистика». М. Інфра-М, 2002р.
60. Ілішев а. м. Загальна теорія статистики: Підручник. - М: ЮНІТІ-ДАНА, 2008.
61. Мінашкін В. Г., Р. О. Шмойлова, Н. А. Садовнікова теорія статистики: навчальний посібник - М.: Маркет ДС, 2006
62. Мхіторяна Ст С. М., Статистика. Підручник/За ред. проф. Економіст. 2005.
63. Харченко Л.П., В. Г. Іонін, В. В. Глинський Статистика: Підручник.- 3-тє вид., перероб. та дод. - М: ІНФРА-М, 2010
64. Шмойлової Р.А. теорія статистики / за ред. проф. Шмойлової Р. А. М., Фінанси та статистика, кілька видань.