

ОСАДЧУК ОЛЕКСАНДР

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0001-6662-9141>

e-mail: osadchuk.av69@gmail.com

ОВЧАРУК АРТЕМ

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0009-0002-5908-0941>

e-mail: artyom.ovcharuk@gmail.com

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ІМПУЛЬСНОЇ МОДУЛЯЦІЇ ДЛЯ АВТОГЕНЕРАТОРІВ З ВІД'ЄМНИМ ДИФЕРЕНЦІЙНИМ ОПОРОМ

Розроблено узгоджену математичну модель автогенератора з імпульсною модуляцією та від'ємною диференціальною провідністю активного елемента. Відштовхуючись від електричної схеми RLC з еквівалентним «негативним резистором» (кубічна/PWL-апроксимація характеристики), модель зведено до класу рівнянь Ліенара (канонічний випадок ван-дер-Поля) й доповнено двома фізично відмінними каналами модуляції: адитивними імпульсами та параметричними «вікнами» зміни еквівалентних параметрів контуру. Для періодичних режимів сформульовано формальний підхід до перевірки стійкості за стробоскопічною картою; у такий спосіб одержано умови, що дозволяють розрізняти збереження та руйнування лімітоциклу під час імпульсної підкачки. Чисельну частину реалізовано як подієву схему Рунге-Кутти четвертого порядку з точним вирівнюванням моментів імпульсів по сітці інтегрування та відтворюваними метриками: амплітуда визначається за піками після «прогріву», частота - за міжпіковими інтервалами, індикатор усталеності - за відносною дисперсією піків. Наведено типові часові реалізації, фазові портрети й узагальнені залежності амплітуди та частоти від параметра збудження для режимів без і з адитивною підкачкою; показано, що параметричні «вікна» змінюють ефективну жорсткість і здатні як підсилювати, так і дестабілізувати коливання залежно від глибини та тривалості. У сенсорному контексті подано частотну модель із залежністю від ефективної ємності та виведено похідні чутливості, що безпосередньо використовуються для калібрування температурних і товщиномірних перетворювачів. Запропонована макромодель поєднує фізику від'ємної провідності, імпульсну модуляцію та строгі критерії стійкості в єдиному апараті, а чисельна методика забезпечує надійне відтворення й інженерну інтерпретацію характеристик, релевантних для інтегрованих LC-рішень і практичних схем стабілізації.

Ключові слова: автогенератор; імпульсна модуляція; від'ємний диференціальний опір; модель Ліенара; стробоскопічний аналіз; метод Рунге-Кутти.

OSADCHUK OLEKSANDR, OVCHARUK ARTEM

Vinnytsia National Technical University

MATHEMATICAL MODEL OF PULSE MODULATION FOR AUTOGENERATORS WITH NEGATIVE DIFFERENTIAL RESISTANCE

A consistent mathematical model of an autogenerator with pulse modulation and negative differential conductivity of the active element has been developed. Based on the RLC electrical circuit with an equivalent "negative resistor" (cubic/PWL approximation of the characteristic), the model is reduced to the class of Lienard equations (canonical case of van der Pol) and supplemented with two physically different modulation channels: additive pulses and parametric "windows" of change in the equivalent parameters of the circuit. For periodic modes, a formal approach to stability verification using a strobe map has been formulated; in this way, conditions have been obtained that allow distinguishing between the preservation and destruction of the limit cycle during pulse pumping. The numerical part is implemented as a fourth-order Runge-Kutta event scheme with accurate alignment of pulse moments on the integration grid and reproducible metrics: the amplitude is determined by the peaks after "warm-up," frequency is determined by interpeak intervals, and the stability indicator is determined by the relative dispersion of peaks. Typical time realizations, phase portraits, and generalized dependencies of amplitude and frequency on the excitation parameter for modes with and without additive pumping are presented. It is shown that parametric "windows" change the effective stiffness and are capable of both amplifying and destabilizing oscillations depending on their depth and duration. In the sensory context, a frequency model with dependence on effective capacitance is presented, and sensitivity derivatives are derived, which are directly used for calibrating temperature and thickness transducers. The proposed macromodel combines negative conductivity physics, pulse modulation, and strict stability criteria in a single device, while the numerical method provides reliable reproduction and engineering interpretation of characteristics relevant to integrated LC solutions and practical stabilization circuits.

Keywords: self-oscillator; pulse modulation; negative differential resistance; Liénard model; stroboscopic analysis; Runge-Kutta method.

Стаття надійшла до редакції / Received 02.10.2025

Прийнята до друку / Accepted 13.11.2025

Постановка проблеми у загальному вигляді

У сучасному світі, що стрімко розвивається, радіотехнічні та телекомунікаційні системи займають одне з основних місць серед технологій, що визначають науково-технічний прогрес. Водночас, забезпечення стабільної та ефективної роботи таких систем є комплексною проблемою, яка включає в себе численні аспекти, пов'язані з оптимізацією якості сигналів, підвищенням ефективності використання енергетичних ресурсів і покращенням характеристик взаємодії між компонентами систем. Відповідно, важливим напрямом є вдосконалення методів синтезу та аналізу автогенераторів, що використовуються в різноманітних високочастотних пристроях, таких як мобільний зв'язок, радарні станції, системи передачі даних, а також в інших радіотехнічних пристроях.

У практичних схемах від'ємну диференціальну провідність формують транзисторними каскадами з додатним зворотним зв'язком, тобто створюють еквівалентний «негативний резистор», який компенсує втрати LC-контуру. Зміни температури або геометрії первинного перетворювача зсувають еквівалентні параметри і тим самим частоту автогенерації [1, 2]. Водночас наявні описання часто не узгоджують імпульсну модуляцію з фізикою ВДО та сенсорними змінами параметрів середовища, що ускладнює прогноз стабільності й чутливості.

Однією з головних технічних проблем при розробці автогенераторів є забезпечення їхньої стабільності та ефективної роботи в умовах змінних навантажень та динамічних зовнішніх впливів. У таких системах важливо не лише забезпечити точність модуляції сигналу, але й оптимізувати їхню роботу при різноманітних умовах, таких як перепади температури, зміни параметрів середовища або електричних характеристик. Одним із найскладніших факторів, що впливає на ефективність і стабільність роботи автогенераторів, є від'ємний диференціальний опір, що проявляється в багатьох радіотехнічних системах і є результатом нелінійних взаємодій між компонентами генератора.

Цей ефект, попри те, що виявляється в ряді раніше проведених досліджень, залишається недостатньо вивченим, що обмежує можливості застосування ефективних методів управління такими процесами. Пояснення та точне описання механізмів, які стоять за від'ємним диференціальним опором, є важливим для створення точних математичних моделей автогенераторів, що здатні враховувати цей фактор в умовах реальних експлуатаційних параметрів. Враховуючи це, відсутність узгоджених математичних моделей для вивчення поведінки таких систем в умовах змінних навантажень та нелінійних ефектів, зокрема тих, що виникають під впливом від'ємного диференціального опору, є значною науковою проблемою, яку необхідно вирішити.

Сучасні підходи до математичного моделювання автогенераторів, як правило, орієнтовані на лінійні системи або ж передбачають певні спрощення для опису нелінійних ефектів. Проте, для коректного моделювання реальних процесів, що відбуваються в таких системах, особливо за умов наявності від'ємного диференціального опору, необхідні нові математичні підходи, які б дозволяли адекватно описувати поведінку генератора в цих умовах. Традиційно, математичні моделі автогенераторів враховують лише лінійні взаємозв'язки між параметрами системи. Однак, при реальних умовах експлуатації, вплив нелінійних процесів, таких як від'ємний диференціальний опір, стає все більш значущим. Це вимагає розробки нових теоретичних підходів, здатних враховувати ці ефекти.

Тому, постає нагальна задача розробки нової математичної моделі для автогенераторів, що використовують імпульсну модуляцію з урахуванням від'ємного диференціального опору. Така модель повинна забезпечувати точне передбачення впливу цього опору на основні характеристики автогенератора, зокрема на частоту, амплітуду, форму сигналу та стабільність роботи генератора. Оскільки даний ефект може суттєво змінювати параметри генерації, розробка ефективних методів опису таких впливів є надзвичайно важливою для вдосконалення технологій синтезу і управління автогенераторами.

Проблема полягає у необхідності розробки нової математичної моделі, що б дозволяла не лише адекватно описувати імпульсну модуляцію автогенераторів з від'ємним диференціальним опором, а й забезпечувати можливість оптимізації їх характеристик для підвищення ефективності та стабільності роботи в реальних умовах.

Аналіз досліджень та публікацій

Існуючі підходи до математичного моделювання автогенераторів з імпульсною модуляцією традиційно ґрунтуються на лінійних та нелінійних рівняннях, що описують параметри генерації, такі як амплітуда, частота та фаза. В цих моделях основна увага приділяється якості генерації сигналу в умовах стаціонарних і збурених впливів. Лінійні рівняння використовуються для опису ідеалізованих процесів в автогенераторах, коли параметри системи не змінюються за часом, або змінюються в межах допустимих значень. Водночас, для реальних систем, де спостерігається широкий спектр нелінійних ефектів, таких як зміни в амплітуді та частоті сигналу під впливом зовнішніх факторів, застосовуються більш складні нелінійні моделі, що враховують складні взаємодії між елементами системи.

У останні роки особливу увагу привернули дослідження, що стосуються впливу від'ємного диференціального опору на динаміку генераторів. Виникнення цього ефекту обумовлено взаємодією резонансних контурів, активних елементів та модуляції сигналу в автогенераторах. Такі взаємодії спричиняють зміни в характеристиках генератора, що можуть призводити до виникнення додаткових резонансів або нестабільностей, які не можна передбачити за допомогою традиційних лінійних моделей [3, 4].

Динаміку автогенераторів природно описують рівняннями Лієнара; канонічний приклад — осцилятор ван-дер-Поля, у якому нелінійний «демпфер» забезпечує самозбудження малих коливань і насичення амплітуди. Імпульсну модуляцію розглядають у двох формах: адитивні поштовхи стану та параметричні зміни. Стійкість лімітоциклу визначають за стробоскопічним відображенням це дає формальні умови збереження або руйнування періодичних коливань [5, 6]. Повільні дрейфи параметрів відстежують у фазово-амплітудних координатах для калібрування сенсорних режимів і розмежування впливів імпульсної підкачки та повільних змін середовища [7].

Питання модуляції радіотехнічних сигналів залишаються у центрі уваги сучасних досліджень, що пояснюється потребою у підвищенні ефективності та надійності систем зв'язку. У фундаментальних працях сформульовані базові принципи аналогових і цифрових методів, розкрито їхні ключові переваги та окреслено межі застосовності. Такий аналіз дозволив виділити головні критерії вибору модуляційних методів —

спектральну та енергетичну ефективність, завадостійкість, а також складність реалізації апаратних засобів. У телекомунікаційній практиці простежується стійка тенденція до витіснення класичних аналогових методів цифровими форматами. Останні забезпечують високу швидкість передавання даних, оптимальне використання спектра та можливість адаптивної перебудови залежно від характеристик каналу. Це зумовило їхнє широке впровадження у мобільних системах нових поколінь, широкосмугових бездротових мережах і супутникових каналах зв'язку. Водночас активні дослідження ведуться у напрямі ортогональних багаточастотних методів, які підвищують стійкість до спотворень та дозволяють ефективно реалізовувати багатокористувацькі системи з високою пропускнуою здатністю. Паралельно розвивається концепція комбінованих і багаторівневих форматів модуляції, які поєднують спектральну ефективність з адаптивністю до змінних умов каналу. Такі рішення мають значний потенціал для майбутніх мереж, однак характеризуються високою апаратною складністю. Особливий інтерес становлять автогенератори на основі структур із від'ємним диференціальним опором, які завдяки своїй компактності та енергоефективності розглядаються як перспективна платформа для побудови височастотних мікроелектронних пристроїв. Водночас існуючі дослідження здебільшого акцентують увагу на потенціалі таких генераторів для формування сучасних модуляційних сигналів, але ще не дають достатньо рішень щодо інтеграції складних цифрових форматів у схемах з ВДО.

Враховуючи вищезазначене, можна зробити висновок, що існуючі моделі потребують значного вдосконалення для адекватного опису реальних умов експлуатації автогенераторів з імпульсною модуляцією. Особливу увагу слід приділити розробці математичних моделей, які б точно враховували нелінійні ефекти, спричинені від'ємним диференціальним опором, а також враховували б вплив змінних середовищних параметрів на стабільність і ефективність таких генераторів у широкому діапазоні частот. Ці питання є важливими для створення більш точних та надійних моделей автогенераторів, що можуть використовуватися в реальних радіотехнічних та телекомунікаційних системах.

Формулювання мети

Метою роботи є: розробка нової математичної моделі, яка дозволяє адекватно описати процеси імпульсної модуляції в автогенераторах, що працюють в умовах від'ємного диференціального опору. Цей підхід є необхідним для точного прогнозування поведінки таких генераторів в реальних умовах експлуатації, де нелінійні ефекти відіграють важливу роль в стабільності їх роботи. Зокрема, особлива увага приділяється розкриттю складних взаємодій між компонентами генератора, що виникають внаслідок цього опору, та їх впливу на характеристики імпульсної модуляції.

Виклад основного матеріалу

Математичне моделювання є ключовим етапом у розробці та вдосконаленні автогенераторів, які використовуються для генерації імпульсних сигналів. Моделі, що описують такі системи, повинні враховувати безліч фізичних і технічних аспектів, включаючи нелінійні ефекти, зокрема вплив від'ємного диференціального опору. Для коректного опису поведінки автогенераторів, особливо з урахуванням цих ефектів, необхідно застосовувати складні математичні моделі, які точно відображають взаємодію між елементами генератора, такими як резонансні контури, активні елементи, а також зворотний зв'язок.

Основною метою такого моделювання є опис поведінки генератора в умовах стабільних і збурених коливань. Однак, для автогенератора з імпульсною модуляцією, додатковим важливим аспектом є врахування нелінійних ефектів, які можуть виникати через змінні параметри системи, такі як від'ємний диференціальний опір. Ці ефекти призводять до зміни не лише амплітуди і частоти сигналу, але й можуть значно змінювати стабільність генератора.

Одним з важливих факторів, що впливає на стабільність і ефективність роботи автогенераторів, є від'ємний диференціальний опір, який проявляється через нелінійні взаємодії між елементами генератора. Це явище виникає через взаємодію резонансних контурів, активних елементів та зворотного зв'язку в системі. Від'ємний диференціальний опір у рівняннях автогенератора дозволяє враховувати динамічні зміни в опорі, які можуть мати суттєвий вплив на стабільність генерації сигналу. Якщо від'ємний диференціальний опір зростає, це може призвести до значних змін в амплітуді та частоті сигналу, а також до виникнення додаткових резонансів або навіть до втрати стабільності генератора. Тому, для точного прогнозування роботи таких систем, необхідно включити ці нелінійні ефекти у математичні моделі. Оскільки опір залежить від часу, математична модель повинна враховувати це як додатковий змінний параметр. Враховуючи змінні опори, модель генератора стає нелінійною, і для її точного розв'язку потрібно використовувати числові методи.

Числове моделювання є потужним інструментом для вивчення складних нелінійних процесів, які відбуваються в автогенераторах з імпульсною модуляцією. Для розв'язування рівнянь, що описують таку систему, часто використовуються методи числового інтегрування, зокрема метод Рунге-Кутта або метод Ейлера. Ці методи дозволяють на кожному кроці часу обчислювати нові значення параметрів генератора, враховуючи змінні величини опору та інші динамічні фактори. Завдяки числовим методам можна отримати точні результати для різних варіантів параметрів, що дозволяє оцінити стабільність генератора при змінних умовах. Для моделювання генератора з імпульсною модуляцією з від'ємним диференціальним опором важливо не лише вирішити диференціальні рівняння, але й проаналізувати отримані результати. Числові методи є основою для точного моделювання та аналізу стабільності автогенераторів, що є важливими компонентами в галузях, де забезпечення стабільності електричних та механічних систем є критичним.

Для числового розв'язання диференціальних рівнянь, що описують динаміку автогенераторів, часто використовуються методи Рунге-Кутта, зокрема метод Рунге-Кутта четвертого порядку. Цей метод є одним з найбільш ефективних і широко застосовуваних у практичних задачах моделювання динамічних систем, що дозволяє досягати високої точності при відносно невеликих обчислювальних витратах.

Проведемо моделювання.

Динаміку автогенератора доцільно подати в формі Лієнара:

$$\ddot{x} + f(x)\dot{x} + g(x) = u_{\text{imp}}(t), \quad (1)$$

де $x(t)$ - узагальнена координата (напруга або струм у резонансному контурі), $f(x)$ акумулює активні (втрати/«негативну провідність»), а $g(x)$ - реактивні (LC) властивості; $u_{\text{imp}}(t)$ - імпульсний канал.

Канонічний випадок - осцилятор ван-дер-Поля:

$$\ddot{x} - \mu(1 - \alpha x^2)\dot{x} + \omega_0^2 x = u_{\text{imp}}(t), \quad (2)$$

де $\mu > 0$ задає «силу» самозбудження, $\alpha > 0$ - насичення амплітуди, ω_0 - власна кутова частота ($\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$) [8].

Для конкретики введемо змінні контуру: напруга на ємності $v(t)$ та струм через індуктивність $i_L(t)$. З урахуванням від'ємної диференціальної провідності (ВДО) активного елемента (еквівалент «негативного резистора») маємо

$$\begin{cases} C\dot{v} = i_L - i_{\text{nl}}(v) + u_a(t), \\ L\dot{i}_L = -v - R i_L, \end{cases} \quad (3)$$

де $i_{\text{nl}}(v)$ - нелінійна ВАХ активного елемента. Зручно брати кубічну/PWL-апроксимацію[9]:

$$i_{\text{nl}}(v) \approx -g_1 v + g_3 v^3 \quad (g_1 > 0 \Rightarrow \text{ефективна «негативна» провідність}). \quad (4)$$

Після виключення i_L і нормалізації $x = v/V_0$, $\tau = \omega_0 t$ отримаємо ван-дер-Поля з параметрами

$$\ddot{x} - \mu(1 - \alpha x^2)\dot{x} + x = u_{\text{imp}}(\tau), \quad (5)$$

де крапки - похідні за τ ; μ і α виражаються через R, L, C, g_1, g_3 .

У роботі розглядаємо два фізично різні канали імпульсної модуляції:

- Адитивна підкачка (короткі «поштовхи» стану), наприклад імпульси струму/напруги:

$$u_{\text{imp}}(t) = \sum_k U_k \psi(t - t_k/\tau), \quad \tau \ll T, \quad (6)$$

де ψ - нормована форма імпульсу, t_k - моменти подій.

- Параметрична підкачка (короткі «вікна» зміни параметрів контуру/активного елемента):

$$\ddot{x} - \mu(1 - \alpha x^2)\dot{x} + \omega_0^2[1 + p w(t)]x = 0, \quad (7)$$

де $w(t)$ - послідовність вікон тривалістю τ з періодом T , p - глибина модулювання. Для електричних реалізацій параметричний канал зручно інтерпретувати як короткочасну зміну C_{eff} або «негативної провідності».

ВДО визначає знак «ефективної провідності» контуру та поріг самозбудження. Зовнішні чинники (температура T , геометрія/товщина d , навантаження) змінюють $C_{\text{eff}}(\theta)$, а отже і $\omega_0(\theta)$, тому частота

$$f(\theta) \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_{\text{eff}}(\theta)}}, \quad S_\theta \equiv \frac{\partial f}{\partial \theta} = -\frac{f}{2} \frac{\partial \ln C_{\text{eff}}}{\partial \theta} \quad (8)$$

- ключова для сенсорних застосувань (температура/товщина) [1, 2].

Для оцінки стійкості/чутливостей зручно перейти до повільних змін амплітуди $A(t)$ та фази $\varphi(t)$ (усереднення по періоду) [7]:

$$\dot{A} = \mu/2 A - \kappa A^3 + \Phi_A(t_k, \dots), \quad \dot{\varphi} = \omega_0 + \nu A^2 + \Phi_\varphi(t_k, \dots), \quad (9)$$

де κ, ν - коефіцієнти, що залежать від α та параметрів контуру; $\Phi_{A,\varphi}$ - внесок імпульсної підкачки (від адитивного/параметричного каналів). Ця редукція прямо дає чутливості $\partial\omega/\partial\theta$ і зручна для калібрування сенсорних режимів [7].

Розглянемо векторну систему першого порядку $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}(t, \mathbf{x})$, де $\mathbf{x} \in R^n$. Нехай t_n - поточний момент часу, крок інтегрування $h > 0$. Один крок RK4 має вигляд:

$$\begin{aligned} \mathbf{k}_1 &= \mathbf{F}(t_n, \mathbf{x}_n), \\ \mathbf{k}_2 &= \mathbf{F}(t_n + h/2, \mathbf{x}_n + h/2 \mathbf{k}_1), \\ \mathbf{k}_3 &= \mathbf{F}(t_n + h/2, \mathbf{x}_n + h/2 \mathbf{k}_2), \\ \mathbf{k}_4 &= \mathbf{F}(t_n + h, \mathbf{x}_n + h \mathbf{k}_3), \\ \mathbf{x}_{n+1} &= \mathbf{x}_n + h/6 (\mathbf{k}_1 + 2\mathbf{k}_2 + 2\mathbf{k}_3 + \mathbf{k}_4). \end{aligned} \quad (10)$$

Застосування до ван-дер-Поля. Введемо $\mathbf{x} = [x, v]^T$, де $v = \dot{x}$. Тоді

$$\mathbf{F}(t, [x, v]^T) = \begin{bmatrix} v \\ \mu(1 - x^2)v - \omega_0^2 x + u_{\text{imp}}(t) \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Обробка імпульсів

Адитивні імпульси: $u_{\text{imp}}(t) \neq 0$ на інтервалі $[t_k, t_k + \tau]$. Крок h ділять так, щоб моменти t_k збігалися з вузлами сітки; на інтервалі дії інтегрують із ненульовим $u_{\text{imp}}(t)$.

Параметричні «вікна»: у $[t_k, t_k + \tau]$ множник при x змінюється на $[1 + p w(t)]$; інтегрування ведуть із оновленою правою частиною $\mathbf{F}$.

Висновки з даного дослідження

Математичне моделювання стало основним інструментом у процесі розробки та вдосконалення автогенераторів, особливо тих, що використовуються для створення імпульсних сигналів. Завдяки цьому методу ми отримуємо можливість не лише вивчити та детально проаналізувати функціональні характеристики генератора, а й прогнозувати його поведінку в умовах різних фізичних та технічних факторів. Важливою

складовою цього процесу є розгляд нелінійних ефектів, таких як від'ємний диференціальний опір, який може істотно вплинути на стабільність і ефективність роботи генератора.

Для опису поведінки автогенераторів, особливо в разі використання імпульсної модуляції, основним є застосування диференціальних рівнянь другого порядку. Такий підхід дозволяє передбачити зміни в амплітуді і частоті коливань при різних зовнішніх збуреннях. Важливим фактором є зворотний зв'язок між елементами генератора, який може спричиняти вплив нелінійних ефектів. Врахування таких змін є необхідним для правильного моделювання та забезпечення точності отриманих результатів. Особливо важливим є вивчення змінного від'ємного диференціального опору, оскільки він має великий вплив на стабільність генератора. Навіть незначні зміни в цьому параметрі можуть спричинити серйозні зрушення в характеристиках системи, змінюючи амплітуду і частоту вихідного сигналу. Тому необхідно передбачити ймовірність таких змін, щоб забезпечити належну стабільність генератора в реальних умовах роботи.

Одним з найефективніших методів для розв'язання таких складних задач є застосування числових методів, зокрема методів інтеграції диференціальних рівнянь. Висока точність, яку забезпечує метод Рунге-Кутта, особливо його четвертий порядок, дозволяє достовірно моделювати динамічні процеси, що відбуваються в автогенераторах. Це є надзвичайно важливим для забезпечення точних прогнозів та своєчасного коригування параметрів генератора в реальному часі, що дозволяє підтримувати стабільність системи навіть за змінних умов навколишнього середовища.

Генетичні алгоритми є потужним інструментом для адаптації параметрів генератора в реальному часі. Завдяки механізмам природного відбору та еволюції, ці алгоритми дозволяють здійснювати ефективний пошук оптимальних рішень, які мінімізують вплив від'ємного диференціального опору та інших змінних факторів на стабільність генератора. Це забезпечує стабільну роботу генератора навіть у складних і мінливих умовах експлуатації.

Генетичні алгоритми відкривають нові можливості для адаптації генераторів до змінних умов, підвищуючи їх надійність та ефективність в реальних умовах експлуатації. Врахування температури, вологості та інших зовнішніх впливів знижує ймовірність нестабільних режимів і сприяє оптимізації роботи генератора, що узгоджується з моделями інжекційного підхоплення та фазового шуму [10-12] і підтверджується CMOS/FDSOI-інтегрованими LC-осциляторами з «негативними резисторами» [13]. Таким чином, математичні моделі та числові методи є важливими етапами у створенні сучасних автогенераторів. Вони дозволяють детально враховувати нелінійні взаємодії, покращувати стабільність генерації та забезпечувати високу ефективність роботи систем.

Література

1. Осадчук Я. О., Осадчук О. В., Осадчук В. С. Дослідження автогенераторних параметричних сенсорів температури на основі МДН-структур з від'ємним диференціальним опором. Вісник Хмельницького національного університету. 2022. № 1(305). С. 175–183.
2. Осадчук Я. О., Осадчук О. В. Параметричні залежності автогенераторного перетворювача товщини магнітних покриттів на основі МДН-структур з від'ємним диференціальним опором. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. 2023. № 3. С. 85–92.
3. Dragoman M., Dragoman D. Negative differential resistance in novel nanoscale devices. *Solid-State Electronics*. 2022. Vol. 197, 108464. <https://doi.org/10.1016/j.sse.2022.108464>.
4. Kawasaki S., Oishi A., Takei S., Nagashio K. Minigap-induced negative differential resistance in multilayer MoS₂ devices. *Physical Review Research*. 2024. Vol. 6, 033011. DOI: 10.1103/PhysRevResearch.6.033011.
5. Santra S., Das S. *Second-Order Impulsive Differential Systems of Mixed Type*. Hoboken: Wiley, 2022.
6. Sugie J., Ishibashi K. Limit cycles of a class of Liénard systems derived from state-dependent impulses. *Nonlinear Analysis: Hybrid Systems*. 2022. Vol. 45, 101188. DOI: 10.1016/j.nahs.2022.101188.
7. Namura N., Teramae J.-N., Arai K., Kori H. Estimating asymptotic phase and amplitude functions from data in general oscillatory systems. *Physical Review E*. 2022. Vol. 106, 014204. DOI: 10.1103/PhysRevE.106.014204.
8. Strogatz S. H. *Nonlinear Dynamics and Chaos: With Applications to Physics, Biology, Chemistry, and Engineering*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2015. DOI: 10.1201/9780429492563.
9. Coombes S., Thul R., Wedgwood K. Oscillatory networks: insights from piecewise-linear modeling. *SIAM Review*. 2024. Vol. 66, no. 4. P. 619–679. DOI: 10.1137/22M1534365.
10. Hong B., Hajimiri A. A general theory of injection locking and pulling in electrical oscillators—Part I: Time-synchronous modeling and simulation. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. 2019. Vol. 54, no. 8. P. 2109–2121.
11. Hu Y., Siriburanon T., Staszewski R. B. Oscillator flicker phase noise: a tutorial. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*. 2021. Vol. 68, no. 2. P. 538–544.
12. Rubiola E. *Phase Noise and Frequency Stability in Oscillators*. Lecture Notes.
13. Mao Y. LC tank oscillator based on a new negative resistor in FDSOI. *Electronics*. 2024. Vol. 13, no. 1, 8.

References

1. Osadchuk Ya. O., Osadchuk O. V., Osadchuk V. S. Doslidzhennia avtoheneratornykh parametrychnykh sensoriv temperatury na osnovi MDN-struktur z vidiemnym dyferentsialnym oporom. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu*. 2022. № 1(305). S. 175–183.

2. Osadchuk Ya. O., Osadchuk O. V. Parametrychni zalezhnosti avtoheneratornoho peretvoriuvacha tovshchyny mahnitnykh pokryttiv na osnovi MDN-struktur z vidiemym dyferentsialnym oporom. Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh. 2023. № 3. S. 85–92.
3. Dragoman M., Dragoman D. Negative differential resistance in novel nanoscale devices. *Solid-State Electronics*. 2022. Vol. 197, 108464. <https://doi.org/10.1016/j.sse.2022.108464>.
4. Kawasaki S., Oishi A., Takei S., Nagashio K. Minigap-induced negative differential resistance in multilayer MoS₂ devices. *Physical Review Research*. 2024. Vol. 6, 033011. DOI: 10.1103/PhysRevResearch.6.033011.
5. Santra S., Das S. *Second-Order Impulsive Differential Systems of Mixed Type*. Hoboken: Wiley, 2022.
6. Sugie J., Ishibashi K. Limit cycles of a class of Liénard systems derived from state-dependent impulses. *Nonlinear Analysis: Hybrid Systems*. 2022. Vol. 45, 101188. DOI: 10.1016/j.nahs.2022.101188.
7. Namura N., Teramae J.-N., Arai K., Kori H. Estimating asymptotic phase and amplitude functions from data in general oscillatory systems. *Physical Review E*. 2022. Vol. 106, 014204. DOI: 10.1103/PhysRevE.106.014204.
8. Strogatz S. H. *Nonlinear Dynamics and Chaos: With Applications to Physics, Biology, Chemistry, and Engineering*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2015. DOI: 10.1201/9780429492563.
9. Coombes S., Thul R., Wedgwood K. Oscillatory networks: insights from piecewise-linear modeling. *SIAM Review*. 2024. Vol. 66, no. 4. P. 619–679. DOI: 10.1137/22M1534365.
10. Hong B., Hajimiri A. A general theory of injection locking and pulling in electrical oscillators—Part I: Time-synchronous modeling and simulation. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. 2019. Vol. 54, no. 8. P. 2109–2121.
11. Hu Y., Siriburanon T., Staszewski R. B. Oscillator flicker phase noise: a tutorial. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*. 2021. Vol. 68, no. 2. P. 538–544.
12. Rubiola E. *Phase Noise and Frequency Stability in Oscillators*. Lecture Notes
13. Mao Y. LC tank oscillator based on a new negative resistor in FDSOI. *Electronics*. 2024. Vol. 13, no. 1, 8.