

Л. В. ВАХОНІНА

кандидат фізико-математичних наук,  
доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки  
Миколаївський національний аграрний університет  
ORCID: 0000-0002-1668-2275

В. А. МАРДЗЯВКО

асистент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки  
Миколаївський національний аграрний університет  
ORCID: 0000-0001-7327-9215

А. Ю. РУДЕНКО

асистент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки  
Миколаївський національний аграрний університет  
ORCID: 0000-0002-5103-6412

## РЕЗОНАНСНИЙ ГЕНЕРАТОР ІМПУЛЬСІВ НА ОСНОВІ ДІОДА

*Забезпечення якісного зберігання зерна є важливим завданням агропромислового комплексу, оскільки патогенні мікроорганізми, комахи та інші шкідники можуть значно впливати на його якість і спричиняти значні втрати. Традиційні методи знезараження, такі як хімічна обробка або термічний вплив, мають низку недоліків, зокрема можливість залишкових хімічних сполук або теплового пошкодження зерна. У зв'язку з цим перспективним напрямом є використання електромагнітних імпульсів високої частоти, що дозволяють ефективно знищувати патогени без шкоди для продукту.*

*У цій роботі розглядається розробка резонансного генератора імпульсів на основі діода як основного нелінійного елемента, що дозволяє генерувати імпульси високої частоти та амплітуди. Досліджується застосування напівпровідникових діодів із негативним диференціальним опором (тунельних та Ганн-діодів), які здатні підтримувати автоколивання у резонансному коливальному контурі. Це дозволяє створювати ефективні електромагнітні імпульси для використання в технологіях знезараження зерна та інших аграрних процесах.*

*У роботі проведено математичне моделювання роботи резонансного генератора, яке враховує його електрофізичні характеристики, взаємодію елементів коливального контуру (індуктивності, ємності) та нелінійні властивості діода. Запропоновано диференціальне рівняння, що описує динаміку генерації імпульсів у такій системі. Використано чисельні методи розв'язку, зокрема метод Рунге-Кутти, для аналізу поведінки струму та напруги в контурі.*

*Результати моделювання показують, що такий генератор забезпечує стабільну генерацію імпульсів із заданими параметрами. Аналіз часових та спектральних характеристик сигналу підтвердив ефективність використання діода як нелінійного елемента для підтримки автоколивань. Крім того, отримані графіки струму та напруги в контурі свідчать про можливість практичного використання такої системи у високочастотних застосуваннях, зокрема для знезараження зерна.*

*Запропонована модель може бути використана для подальших досліджень та оптимізації параметрів генератора імпульсів. Використання таких пристроїв у сільському господарстві відкриває нові можливості для екологічно чистого знезараження продукції без використання хімічних реагентів, що робить їх привабливими для агропромислових підприємств.*

**Ключові слова:** резонансний генератор імпульсів, знезараження зерна, високочастотні імпульси, LC-контур, тунельний діод, Ганн-діод, динаміка коливань, імпульсна електромагнітна обробка.

L. V. VAKHONINA

Candidate of Physical and Mathematical Sciences,  
Associate Professor at the Department of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics  
Mykolaiv National Agrarian University  
ORCID: 0000-0002-1668-2275

V. A. MARDZIAVKO

Assistant at the Department of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics  
Mykolaiv National Agrarian University  
ORCID: 0000-0001-7327-9215

A. YU. RUDENKO

Assistant at the Department of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics  
Mykolaiv National Agrarian University  
ORCID: 0000-0002-5103-6412

## DIODE-BASED RESONANT PULSE GENERATOR

Ensuring high-quality grain storage is an important task of the agro-industrial complex, since pathogenic microorganisms, insects and other pests can significantly affect its quality and cause significant losses. Traditional methods of disinfection, such as chemical treatment or thermal exposure, have a number of disadvantages, in particular the possibility of residual chemical compounds or thermal damage to the grain. In this regard, a promising direction is the use of high-frequency electromagnetic pulses, which allow for the effective destruction of pathogens without harm to the product.

This work considers the development of a resonant pulse generator based on a diode as the main nonlinear element, which allows generating high-frequency and amplitude pulses. The use of semiconductor diodes with negative differential resistance (tunnel and Gunn diodes) is investigated, which are capable of supporting self-oscillations in a resonant oscillatory circuit. This allows creating effective electromagnetic pulses for use in grain disinfection technologies and other agricultural processes.

The work presents a mathematical simulation of the operation of a resonant generator, which takes into account its electrophysical characteristics, the interaction of the elements of the oscillatory circuit (inductance, capacitance) and the nonlinear properties of the diode. A differential equation is proposed that describes the dynamics of pulse generation in such a system. Numerical solution methods, in particular the Runge-Kutta method, are used to analyze the behavior of current and voltage in the circuit.

The simulation results show that such a generator provides stable pulse generation with specified parameters. Analysis of the time and spectral characteristics of the signal confirmed the effectiveness of using a diode as a nonlinear element to support self-oscillations. In addition, the obtained current and voltage graphs in the circuit indicate the possibility of practical use of such a system in high-frequency applications, in particular for grain disinfection.

The proposed model can be used for further research and optimization of the pulse generator parameters. The use of such devices in agriculture opens up new opportunities for environmentally friendly disinfection of products without the use of chemical reagents, which makes them attractive for agro-industrial enterprises.

**Key words:** resonant pulse generator, grain disinfection, high-frequency pulses, LC circuit, tunnel diode, Gunn diode, oscillation dynamics, pulsed electromagnetic processing.

### Постановка проблеми

Забезпечення якісного зберігання зерна є однією з ключових задач агропромислового комплексу. Однією з основних проблем є наявність патогенних мікроорганізмів, комах і шкідників, які можуть призводити до значних втрат продукції та погіршення її якості. Традиційні методи знезараження зерна, такі як хімічна обробка або термічна дія, мають ряд недоліків, зокрема залишкові хімічні сполуки, що можуть негативно впливати на здоров'я людини, або теплове пошкодження зерна, що змінює його поживні властивості.

Одним із перспективних рішень цієї проблеми є використання резонансних генераторів імпульсів, які генерують короткі високочастотні електромагнітні імпульси для ефективного знезараження зерна без використання хімічних реагентів.

Резонансний генератор імпульсів для знезараження зерна – це пристрій, що генерує короткі високочастотні електромагнітні імпульси, які використовуються для боротьби з патогенними мікроорганізмами, комахами та іншими шкідниками в зерні [1]. Основна ідея цієї технології полягає у використанні фізичних властивостей електромагнітних хвиль для створення несприятливих умов для життя мікроорганізмів, зберігаючи при цьому поживні та фізичні властивості самого зерна.

Найбільш зручним технологічним рішенням є використання резонансного генератора імпульсів на основі діода для розмикання ланцюгів рис. 1 [2].

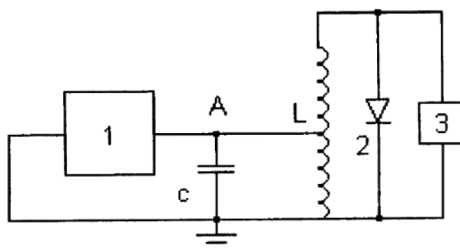


Рис. 1. Принципова електрична схема резонансного генератора імпульсів на основі діода:  
1 – генератор синусоїдальної напруги; 2 – діод; 3 – навантаження

Резонансні генератори імпульсів, що базуються на нелінійних властивостях напівпровідникових діодів, є важливими елементами в сучасній електроніці, особливо у високочастотних застосуваннях. Використання діодів з негативним диференціальним опором, таких як тунельні або Ганн-діоди, дозволяє створювати короткі імпульси з високою частотою та амплітудою. Ці генератори знаходять широке застосування у НВЧ-техніці [3, 4], системах зв'язку, радіолокації та імпульсних джерелах живлення завдяки своїй здатності ефективно генерувати імпульси без складних схем живлення.

Основним компонентом таких генераторів є коливальний контур, який складається з індуктивності та ємності, а також діода, що забезпечує необхідну нелінійність для підтримки генерації імпульсів. Тобто в основі такого генератора лежить принцип коливального контуру, який здатний генерувати високочастотні коливання.

Генератори такого типу використовуються для створення високочастотних імпульсів у радіолокації, генерації надкоротких імпульсів у телекомунікаціях та НВЧ-техніці, де необхідні стабільні і короткі імпульси для передачі або обробки сигналів [5, 6].

Цей принцип роботи дозволяє ефективно генерувати імпульси за допомогою порівняно простих електронних компонентів, використовуючи резонансні властивості контуру та особливості діодів.

Попри значний потенціал цієї технології, дослідження ефективності та оптимізації роботи резонансних генераторів імпульсів у контексті знезараження зерна є недостатньо розвиненим напрямком. Зокрема, необхідне детальне математичне моделювання роботи таких генераторів, аналіз їхніх електрофізичних характеристик, а також оцінка впливу параметрів генератора на ефективність імпульсного знезараження.

Таким чином, постає необхідність у розробці математичних моделей та проведенні чисельного моделювання роботи резонансного генератора імпульсів на основі діода, що дозволить оцінити його ефективність та визначити оптимальні параметри роботи для аграрної сфери та інших високочастотних застосувань.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Останні дослідження у сфері використання резонансних генераторів імпульсів для знезараження зерна демонструють перспективність цього методу. Зокрема, в роботі, представлений у [7, 8], було розроблено резонансний генератор високих напруг для обробки зерна, зараженого грибовою культурою. За допомогою цифрової мікроскопії було зафіксовано руйнування структури грибкових утворень після обробки. Інше дослідження [9] описує експериментальне вивчення процесів у розрядному колі потужної високовольтної імпульсної установки з трьома багатозазорними розрядниками, що працюють паралельно. Отримані осцилограми імпульсів напруги та струму на навантаженні у вигляді трьох реакторів з проточною водою свідчать про ефективність такої установки для знезараження.

Також варто відзначити дослідження, в якому використовувався мікрохвильовий генератор на частоті 2,45 ГГц для обробки зерна. Результати показали, що 15-хвилинна обробка мікрохвилями забезпечує знищення понад 90 % спор грибів родів *Aspergillus* та *Fusarium* [10].

Ці дослідження підкреслюють ефективність використання високочастотних імпульсних генераторів для знезараження зерна, що дозволяє зменшити використання хімічних засобів та зберегти якість продукції.

#### **Формулювання мети дослідження**

Метою цієї роботи є математичне моделювання та аналіз поведінки резонансного генератора імпульсів, що базується на LC-контурі з використанням діода як нелінійного елемента.

#### **Викладення основного матеріалу дослідження**

У випадку резонансного генератора імпульсів діод виконує специфічну роль, що відрізняється від його звичайного використання. У цьому випадку використовуються діоди з особливими властивостями, такими як тунельні діоди або діоди Ганна, які мають нелінійну вольт-амперну характеристику і можуть демонструвати негативний диференціальний опір.

Ця властивість означає, що при збільшенні напруги через діод струм через нього спочатку збільшується, а потім зменшується на певному відрізку кривої. Це створює умови для виникнення автоколивань у резонансному контурі:

- тунельний діод має область, в якій струм зменшується при збільшенні напруги, що сприяє підтримці нестійкого стану та запуску генерації (рис. 2, а) [11];
- діод Ганна використовується для генерації НВЧ-коливань завдяки ефекту перенесення заряду, що створює умови для високочастотних коливань (рис. 2, б) [11].

Діод у резонансному генераторі виконує ключову роль у запуску, підтримці та обмеженні коливань: на початковому етапі, під дією поданої напруги, він пропускає струм і переходить у режим негативного опору, що стимулює ріст коливань у контурі. Під час роботи генератора діод забезпечує підтримку коливань завдяки контролю фази та амплітуди, підтримуючи енергію системи та запобігаючи затуханню завдяки своїм властивостям негативного опору. Як тільки струм або напруга через діод переходять певну межу, він виходить з режиму негативного опору, що викликає спад коливань і перехід до розрядження контуру. У процесі формування імпульсу, діод сприяє швидкому наростанню напруги, що дозволяє створити чіткий імпульс. Коли амплітуда досягає пікового значення,

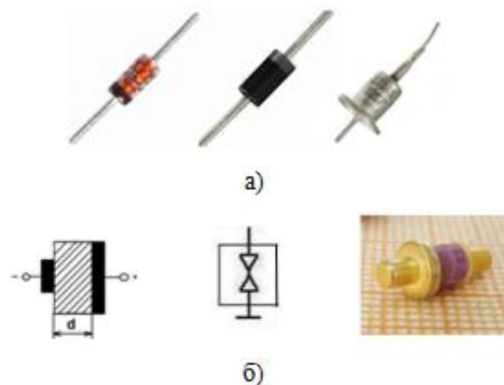


Рис. 2. Види діодів: а) – тунельні діоди, б) – діоди Ганна

діод змінює свій режим роботи, що спричиняє затухання коливань та підготовку контуру до нового циклу формування імпульсу.

Нелінійні властивості діодів є ключовим фактором для створення імпульсів у резонансних генераторах та інших високочастотних пристроях. Для моделювання нелінійної поведінки діода можна використати рівняння:

$$I_D(V) = I_S \cdot \left( e^{\frac{V}{nV_T}} - 1 \right), \quad (1)$$

де  $I_S$  – зворотний насичений струм,  $n$  – коефіцієнт ідеальності,  $V_T$  – тепловий потенціал.

Нелінійні властивості діодів, такі як негативний диференціальний опір, тунельний ефект і ефект Ганна, дозволяють діодам функціонувати як генератори, модулятори та підтримувачі коливань, що забезпечує створення імпульсів у коливальних контурах.

У режимі негативного опору діоди підтримують автоколивання, сприяючи зростанню та підтримці імпульсів без зовнішнього втручання. Тунельні діоди використовують квантове тунелювання для формування коротких високочастотних імпульсів, тоді як діоди Ганна завдяки ефекту переносу електронів генерують НВЧ-коливання [12]. Ці властивості дозволяють застосовувати діоди у генераторах імпульсів, модуляторах сигналів та мікрохвильових генераторах.

Діод також відіграє роль у стабілізації роботи генератора, оскільки його характеристики впливають на форму та стабільність імпульсів. Негативний опір діода дозволяє підтримувати автоколивання з мінімальними втратами енергії, що важливо для ефективності генератора.

Отже, діод у резонансному генераторі імпульсів є ключовим компонентом, який запускає, підтримує і обмежує коливання за рахунок своєї нелінійної вольт-амперної характеристики та режиму негативного диференціального опору.

Математичний опис роботи діода в резонансному генераторі імпульсів, де використовуються його нелінійні властивості, ґрунтується на моделюванні вольт-амперної характеристики (рис. 3) та поведінки в електричному коливальному контурі.

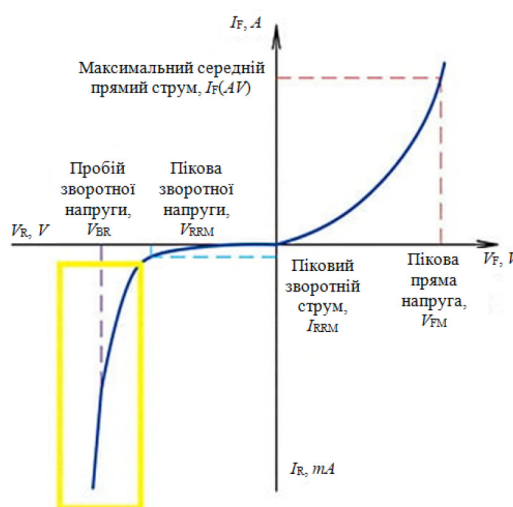


Рис. 3. Вольт-амперної характеристика діода Ганна

Вольт-амперна характеристика діода описує залежність струму  $I$  від напруги  $V$  на діоді, де для діодів з нелінійними властивостями, зокрема діодів Ганна, ця залежність має специфічну форму, що враховує їх нелінійні електричні властивості, які можна описати рівнянням:

$$I_D(V) = I_0 \cdot \left( e^{\frac{V}{nV_T}} - 1 \right) - \alpha V + \beta V^3, \quad (2)$$

де  $I_0$  – насичений зворотний струм,  $q$  – заряд електрона,  $k$  – стала Больцмана,  $T$  – абсолютна температура,  $\alpha$ ,  $\beta$  – коефіцієнти, що описують нелінійні компоненти характеристики (коефіцієнти лінійного та нелінійного опору).

Для опису режиму негативного диференціального опору використовується похідна струму по напрузі:

$$R_{diff} = \frac{dV}{dI}. \quad (3)$$

У випадку негативного диференціального опору  $R_{diff} < 0$ , що означає, що при збільшенні напруги струм зменшується. Це дозволяє підтримувати автоколивання в контурі.

Коливальний контур із підключеним діодом можна описати диференціальним рівнянням:

$$L \frac{d^2 i(t)}{dt^2} + R \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} \int i(t) dt = V_D(i(t)), \quad (4)$$

де  $L$  – індуктивність,  $R$  – активний опір контуру,  $C$  – ємність,  $V_D(i(t))$  – нелінійна функція, що задає напругу на діоді залежно від струму через нього.

Модель діода з негативним опором описує нелінійні властивості діода, де його опір змінюється залежно від напруги. Для математичного моделювання цієї нелінійності часто застосовують кубічну функцію, яка наближено відображає зміну опору діода при різних значеннях напруги, враховуючи його здатність до виникнення негативного опору при певних умовах:

$$V_D(i) = V_0 - \alpha i + \beta i^3, \quad (5)$$

де  $V_0$  – порогова напруга діода, що відповідає переходу в режим негативного опору.

До зазначених умов, можна віднести резонансні умови, які необхідні для підтримки коливань де контур має працювати на частоті, яка близька до резонансної. Це забезпечує максимальний ефект від взаємодії між елементами контуру, таких як індуктивність і ємність, що дозволяє досягти найбільш ефективного коливання при мінімальних енергетичних витратах.

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} \gg 1, \quad (6)$$

де  $Q$  – добротність контуру,  $\omega_0$  – кутова частота, що відповідає резонансній частоті:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad (7)$$

де індуктивності  $L$  і ємності  $C$ , які утворюють резонансну частоту.

Спектральний аналіз імпульсів передбачає подання вихідного сигналу як періодичної функції, яка розкладається в ряд Фур'є:

$$V_{out}(t) = \sum_n A_n \sin(n \cdot \omega_0 \cdot t + \phi_n), \quad (8)$$

де  $A_n$  і  $\phi_n$  – амплітуди і фази гармонік, що залежать від нелінійності діода.

Це дозволяє представити сигнал у вигляді суми гармонік із різними частотами, амплітудами та фазами, що забезпечує детальне вивчення його частотних характеристик та аналіз енергетичного розподілу в спектрі.

Цей математичний опис дозволяє зрозуміти, як саме нелінійні властивості діода впливають на роботу резонансного генератора імпульсів і створення високочастотних коливань.

Принцип роботи резонансного генератора імпульсів на основі діода базується на використанні резонансного коливального контуру, доповненого діодом із нелійними характеристиками, який забезпечує генерацію імпульсів. Нижче наведено докладний опис цього принципу.

На початку роботи генератора при подачі живлення відбувається заряджання коливального контуру, і струм починає протікати через діод. Коли напруга досягає порогового значення, діод переходить у режим негативного опору, що викликає виникнення зворотного зв'язку та ініціює коливання в контурі. Під час фази генерації імпульсів у коливальному контурі відбувається поступове зростання напруги й струму, а діод переходить у режим негативного опору, що посилює коливання і сприяє утворенню імпульсу. Коли амплітуда імпульсу досягає максимуму, діод змінює свій режим на позитивний опір, що призводить до зменшення струму і поступового розрядження

контур, завершуючи коливальний цикл. Після завершення циклу генерації контур повертається до свого початкового стану, де процес зарядки починається знову, і весь цикл повторюється. Це забезпечує періодичну генерацію імпульсів. Стабільна генерація імпульсів забезпечується правильним вибором параметрів коливального контуру і характеристик діода, які повинні відповідати умовам підтримки автоколивань. Важливу роль відіграє висока добротність контуру  $Q$ , що мінімізує енергетичні втрати, а також оптимальні значення критичної напруги та струму діода, які забезпечують стабільний перехід між режимами негативного і позитивного опору.

Вихідний сигнал резонансного генератора є періодичною послідовністю імпульсів, форма і частота яких визначаються параметрами коливального контуру та діода. Частота імпульсів відповідає резонансній частоті контуру, тоді як амплітуда залежить від характеристик діода, таких як критична напруга і струм, а також від умов живлення.

Математична модель резонансного генератора імпульсів на основі діода може бути описана системою рівнянь, яка враховує динамічні властивості елементів схеми, таких як індуктивності, ємності та нелінійний елемент – діод. Така схема зазвичай включає резонансний контур ( $LC$ ), в якому діод використовується для створення нелінійності, що генерує імпульси.

Роботу резонансного генератора можна описати за допомогою системи рівнянь, що враховує взаємодію індуктивності, ємності та нелінійної характеристики діода. Ось як можна математично описати роботу такої системи:

1. Напруга на контурі визначається рівнянням:

$$L \frac{dI(t)}{dt} + V_C(t) = 0, \quad (9)$$

де  $L$  – індуктивність,  $I(t)$  – струм у контурі,  $V_C(t)$  – напруга на ємності.

2. Рівняння для ємності:

$$C \frac{dV_C(t)}{dt} = I(t) - I_D(V_C(t)), \quad (10)$$

де  $C$  – ємність,  $I_D(V_C(t))$  – струм через діод.

3. Нелінійна характеристика діода задається рівнянням для струму через діод (1), що дасть нам моделювання поведінки діода. За допомогою цього рівняння виконається опис експоненційної залежності струму через діод від напруги на ньому, що відображає його нелінійну природу.

Підставивши вираз для  $I_D(V_C(t))$  у рівняння для ємності, отримуємо повну модель системи:

$$C \frac{dV_C(t)}{dt} = I(t) - I_s \left( e^{\frac{V_C(t)}{nV_T}} - 1 \right), \quad (11)$$

та рівняння для струму в індуктивності:

$$L \frac{dI(t)}{dt} = -V_C(t). \quad (12)$$

В результаті, система з двох зв'язаних диференціальних рівнянь першого порядку, що описує роботу генератора, має вигляд:

$$\begin{cases} \frac{dI(t)}{dt} = -\frac{V_C(t)}{L} \\ \frac{dV_C(t)}{dt} = \frac{I(t)}{C} - \frac{I_s}{C} \left( e^{\frac{V_C(t)}{nV_T}} - 1 \right) \end{cases} \quad (13)$$

Ці рівняння разом утворюють повну математичну модель системи, яка описує динаміку роботи резонансного генератора імпульсів (взаємодію між індуктивністю, ємністю та струмом через діод, враховуючи його нелінійну характеристику), враховуючи властивості коливального контуру та нелінійність діода.

Аналіз роботи даної системи та її чисельне рішення можна провести за допомогою чисельних методів інтеграції, таких як метод Рунге-Кутти. Ці методи дозволяють отримати часові залежності напруги та струму в коливальному контурі, моделюючи поведінку резонансного генератора імпульсів. Для реалізації чисельного рішення можна використовувати програмне забезпечення MATLAB, яке підтримує інтеграцію диференціальних рівнянь, що дає змогу досліджувати динамічні характеристики системи.

На рис. 4 показано код на мові MATLAB, який реалізує чисельне моделювання роботи резонансного генератора імпульсів із врахуванням нелінійних характеристик діода.

```

>> % Параметри схеми
L = 1e-3; % Індуктивність (Гн)
C = 1e-6; % Ємність (Ф)
I_S = 1e-12; % Зворотний насичений струм (А)
n = 1; % Коефіцієнт ідеальності
V_T = 26e-3; % Тепловий потенціал (В)

% Початкові умови
I0 = 0; % Початковий струм (А)
V0 = 0.5; % Початкова напруга на діоді (В)

% Час симуляції
tspan = [0 0.01]; % Інтервал часу (с)

% Система диференціальних рівнянь
dydt = @(t, y) [
    -y(2) / L; % dI/dt
    (y(1) / C) - (I_S / C) * (exp(y(2) / (n * V_T)) - 1) % dV/dt
];

% Запуск чисельного інтегратора
[t, y] = ode45(dydt, tspan, [I0, V0]);

% Візуалізація результатів
figure;
subplot(2, 1, 1);
plot(t, y(:, 1));
title('Струм у контурі');
xlabel('Час (с)');
ylabel('Струм (А)');

subplot(2, 1, 2);
plot(t, y(:, 2));
title('Напруга на діоді');
xlabel('Час (с)');
ylabel('Напруга (В)');
>>

```

Рис. 4. Реалізація чисельного моделювання роботи резонансного генератора імпульсів

Основні частини коду:

1. Задання параметрів схеми:

Визначені параметри індуктивності ( $L$ ), ємності ( $C$ ), зворотного насиченого струму ( $I_S$ ), коефіцієнта ідеальності ( $n$ ) та теплового потенціалу ( $V_T$ );

2. Початкові умови:

Початкові значення струму ( $I_0 = 0$ ) і напруги ( $V_0 = 0,5$ ) та часовий інтервал симуляції ( $t_{span} = [0, 0.01]$ );

3. Система диференціальних рівнянь:

Описано функцію `dydt`, яка містить два рівняння: для струму через індуктивність і для напруги на ємності, включаючи нелінійний струм через діод;

4. Чисельне розв'язання:

Застосований метод Рунге-Кутти (`ode45`) для інтеграції системи рівнянь, результати зберігаються у змінних  $t$  (час) і (значення струму і напруги);

5. Візуалізація результатів:

Виведені два графіки:

– струм у контурі ( $I(t)$ ) як функція часу;

– напруга на діоді ( $V_C(t)$ ) як функція часу;

Цей код дає можливість побудувати графіки струму в контурі та напруги на діоді. Перехідні процеси струму в контурі та напруги на діоді представлені на рис. 5.

На основі проведеного моделювання, представлених на рис. 4, можна зробити наступні висновки:

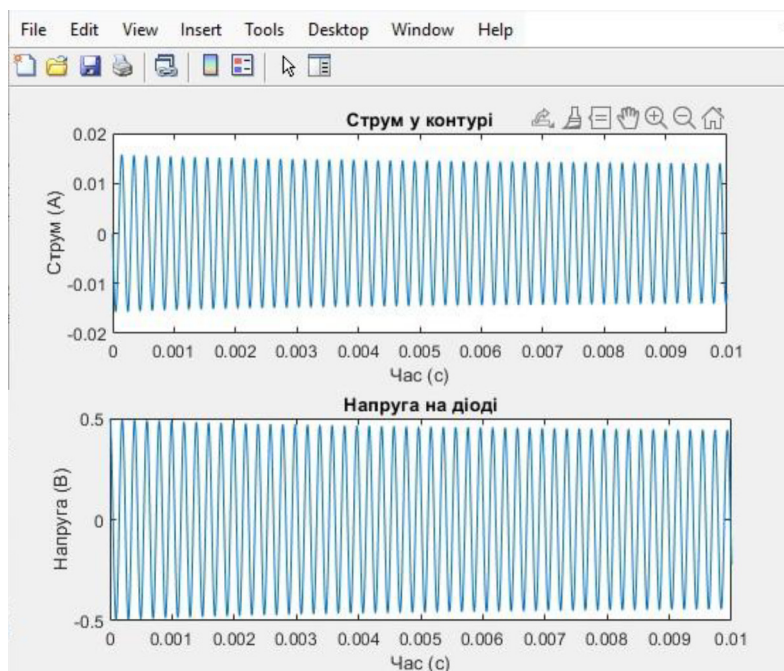


Рис. 5. Перехідні процеси струму в контурі та напруги на діоді резонансного генератора імпульсів

- струм у контурі має коливальний характер, що вказує на наявність резонансних коливань. Це типово для LC-контурів, які можуть підтримувати коливання завдяки накопиченню та передачі енергії між індуктивністю та ємністю;
- амплітуда коливань є стабільною, що свідчить про рівноважний процес без значних втрат або загасання;
- напруга також має коливальний характер і змінюється від позитивних до негативних значень, що вказує на можливі гармонічні процеси, пов'язані з нелінійними властивостями діода;
- якщо діод працює у режимі зміни провідності, це може бути ознакою його дії як перемикача, що створює імпульси.

#### Висновки

Результати моделювання показали, що струм у контурі та напруга на діоді мають коливальний характер із постійною амплітудою. Це свідчить про ефективну генерацію резонансних коливань у системі. Згідно з графіками, амплітуда сигналів залишається стабільною протягом моделювання, що вказує на те, що втрати в контурі компенсуються нелінійною дією діода.

Струм у контурі демонструє періодичні коливання з незначними коливаннями амплітуди на початку, що поступово переходять у стабільний режим. Напруга на діоді змінюється від позитивних до негативних значень, підтверджуючи ефективну роботу діода у режимі перемикачання. Це узгоджується з теоретичними передбаченнями про поведінку діода як нелінійного елемента, що генерує коливання завдяки інжекції та рекомбінації зарядів.

Запропонована модель підтверджує, що використання діодів з їх нелінійними властивостями у резонансних генераторах імпульсів дозволяє забезпечити стабільні коливання. Аналіз результатів показав, що модель є ефективною для вивчення процесів у резонансних системах і може бути використана для подальших досліджень у цій галузі.

#### Список використаної літератури

1. Дубовенко К.В., Захаров Д.О. Знезараження зернової продукції імпульсним коронним розрядом. *Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ»*. 2012. Т. 967, № 61. С. 139–149.
2. Мардзявко В.А., Руденко А. Теоретичні та практичні аспекти застосування генераторів НВЧ для знезараження зернових культур. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2024. Т. 90, № 3. С. 85–94. URL: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.3.11>
3. Салам Буссі Е.П., Кассаблі М. Генератор потужних височастотних пакетних імпульсів струму для живлення ультразвукових електромагнітно-акустичних перетворювачів. *Методи та прилади контролю якості*. 2019. Т. 43, № 2. С. 88–95.
4. Бойко Н., Макагон А. Високовольтна установка імпульсною потужністю 3 МВт для знезараження води у потоці за допомогою наносекундних розрядів у газових бульбах. *Технічна електродинаміка*. 2020. № 5. С. 80–90. URL: <https://doi.org/10.15407/techned2020.05.080>

5. Шебанін В. С., Кошкін Д. Л., Захаров Д. О. Технологічна лінія передпосівної обробки насіння зернових в полі високочастотного коронного розряду. *Engineering of nature management Journal*. 2014. № 1. С. 38–43.
6. Дубовенко К. В., Захаров Д. О. Сучасний стан застосування електрофізичних методів бактерицидної та фунгіцидної обробки зернової продукції. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. 2019. № 1. С. 45–50.
7. Osokina N. Effect of an ultra-high frequency electromagnetic field on the physical properties of spelt grain. *Scientific horizons*. 2024. T. 27, № 3. С. 64–72.
8. Nosov G. V., Pustynnikov S. V., Kuleshova E. O. Transformer generator of powerful current pulses. *Journal of applied mechanics and technical physics*. 2020. № 61. С. 300–306.
9. Руденко А., Кунденко М. Аналіз технології генерації НВЧ випромінювання з визначенням адаптивного типу діодів для подальшого конструювання апаратів для знезараження. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2023. № 3. С. 24–37.
10. Стороженко І., Аркуша Ю. Про підвищення потужності коротких діодів Ганна на основі варізонного InGaPAs. *Вісник харківського національного університету імені В. Н. Каразіна*. 2019. № 31. С. 62–78.
11. Generation of powerful microwave voltage oscillations in a diffused silicon diode / S. K. Lyubutin та ін. *Semiconductors*. 2012. T. 47, № 5. URL: <https://doi.org/10.1134/S1063782613050151>
12. Дарзнец С., Любутін С., Рукін С. Генерація мікрохвильових коливань у діоді без основи. *Напівпровідники*. 2012. № 36. С. 599–604. URL: <https://doi.org/10.1134/1.1478555>

### References

1. Dubovenko, K. V., & Zakharov, D. O. (2012). Disinfection of grain products by pulsed corona discharge. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*, 967(61), 139–149.
2. Mardzyavko, V. A., & Rudenko, A. (2024). Theoretical and practical aspects of the use of microwave generators for disinfection of grain crops. *Bulletin of the Kherson National Technical University*, 90(3), 85–94. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.3.11>
3. Salam Bussi, E. P., & Kassabli, M. (2019). Generator of powerful high-frequency packet current pulses for powering ultrasonic electromagnetic-acoustic converters. *Methods and Devices of Quality Control*, 43(2), 88–95.
4. Boyko, N., & Makogon, A. (2020). High-voltage installation with a pulse power of 3 MW for water disinfection in the flow using nanosecond discharges in gas bubbles. *Technical Electrodynamics*, (5), 80–90. <https://doi.org/10.15407/techned2020.05.080>.
5. Shebanin, V. S., Koshkin, D. L., & Zakharov, D. O. (2014). Technological line for pre-sowing treatment of grain seeds in a high-frequency corona discharge field. *Engineering of nature management Journal*, (1), 38–43.
6. Dubovenko, K. V., & Zakharov, D. O. (2019). Current state of application of electrophysical methods of bactericidal and fungicidal treatment of grain products. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*, (1), 45–50.
7. Osokina, N. (2024). Effect of an ultra-high frequency electromagnetic field on the physical properties of spelt grain. *Scientific horizons*, 27(3), 64–72.
8. Nosov, G. V., Pustynnikov, S. V., & Kuleshova, E. O. (2020). Transformer generator of powerful current pulses. *Journal of applied mechanics and technical physics*, (61), 300–306.
9. Rudenko, A., & Kundenko, M. (2023). Analysis of microwave radiation generation technology with determination of adaptive diode type for further design of disinfection devices. *Integrated Technologies and Energy Saving*, (3), 24–37.
10. Storozhenko, I., & Arkusha, Yu. (2019). On increasing the power of short Gann diodes based on varizone InGaPAs. *Bulletin of the V. N. Karazin Kharkiv National University*, (31), 62–78.
11. Lyubutin, S. K., Rukin, S. N., Slovikovsky, B. G., & Tsyranov, S. N. T. (2012). Generation of powerful microwave voltage oscillations in a diffused silicon diode. *Semiconductors*, 47(5). <https://doi.org/10.1134/S1063782613050151>
12. Darznez, S., Lyubutin, S., & Rukin, S. (2012). Generation of microwave oscillations in a diode without a base. *Semiconductors*, (36), 599–604. <https://doi.org/10.1134/1.1478555>