

---

---

# ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

---

---

УДК 621.37

МИКОЛА КУНДЕНКО, ВІТАЛІЙ МАРДЗЯВКО, АНДРІЙ РУДЕНКО,  
КАТЕРИНА МАРДЗЯВКО, ВАЛЕНТИН МЕЛЬНИК

## МОДЕЛЮВАННЯ РЕЗОНАНСНОГО ГЕНЕРАТОРА ІМПУЛЬСІВ НА ОСНОВІ ДІОДА В СИСТЕМІ ФОРМУВАННЯ НАНОСЕКУНДНИХ СИГНАЛІВ

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»  
м. Харків, Україна, e-mail: Mykola.Kundenko@khpri.edu.ua,  
Миколаївський національний аграрний університет, м. Миколаїв, Україна*

**Анотація.** У роботі представлено підхід до дослідження процесів формування наносекундних імпульсів у системі електромагнітного знезараження зернової маси на основі розробки узагальненої математичної моделі. Запропоновано структуру моделі у вигляді взаємопов'язаних функціональних блоків, що відтворюють роботу реальної установки, зокрема процеси формування вхідного сигналу, його перетворення в резонансному генераторі на основі нелінійного напівпровідникового діода та генерацію імпульсів наносекундної тривалості. У роботі використано методи теорії електричних кіл, математичного та чисельного моделювання, спектрального аналізу сигналів із застосуванням перетворення Фур'є, що дозволило дослідити часові та енергетичні характеристики імпульсів. Особливу увагу приділено врахуванню нелінійних властивостей діода та їх впливу на форму, тривалість і спектр сигналу. Запропонована модель забезпечує можливість комплексного аналізу процесів генерації, передачі та перетворення імпульсів, а також може бути використана як теоретична основа для оптимізації параметрів систем електромагнітного знезараження зернової продукції.

**Ключові слова:** математична модель, наносекундні імпульси, резонансний генератор, LC-контур, діод, електромагнітне знезараження, спектральний аналіз, зернова маса.

**Abstract.** The paper presents an approach to studying the processes of nanosecond pulse formation in the system of electromagnetic disinfection of grain mass based on the development of a generalized mathematical model. The model structure is proposed in the form of interconnected functional blocks that reproduce the operation of a real installation, in particular the processes of input signal formation, its transformation in a resonant generator based on a nonlinear semiconductor diode and the generation of pulses of nanosecond duration. The paper uses methods of the theory of electrical circuits, mathematical and numerical modeling, and spectral analysis of signals using the Fourier transform, which allowed us to study the time and energy characteristics of pulses. Particular attention is paid to taking into account the nonlinear properties of the diode and their influence on the shape, duration, and spectrum of the signal. The proposed model provides the possibility of a comprehensive analysis of the processes of generation, transmission, and conversion of pulses, and can also be used as a theoretical basis for optimizing the parameters of systems of electromagnetic disinfection of grain products.

**Keywords:** mathematical model, nanosecond pulses, resonant generator, LC circuit, diode, electromagnetic disinfection, spectral analysis, grain mass.

**DOI: 10.31649/1681-7893-2026-51-1-321-330**

### ВСТУП

У сучасних умовах розвитку агропромислового комплексу важливим завданням є забезпечення високої якості та безпечності зернової продукції. Одним із ключових аспектів є ефективне знезараження зернової маси від мікробіологічних забруднень із мінімальним впливом на її фізико-хімічні властивості.

---

© МИКОЛА КУНДЕНКО, ВІТАЛІЙ МАРДЗЯВКО, АНДРІЙ РУДЕНКО,  
КАТЕРИНА МАРДЗЯВКО, ВАЛЕНТИН МЕЛЬНИК, 2026

---

---

## ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО

---

---

Традиційні методи обробки, зокрема термічні та хімічні, супроводжуються значними енергетичними витратами або можуть призводити до погіршення якості продукції, що обумовлює необхідність розробки нових технологічних підходів.

Перспективним напрямом є застосування імпульсних електромагнітних полів, сформованих наносекундними імпульсами високої напруги. Такі сигнали забезпечують інтенсивний вплив на біологічні об'єкти за рахунок високої амплітуди та малої тривалості імпульсів, що дозволяє зменшити тепловий ефект і підвищити ефективність обробки. У цьому контексті особливого значення набуває розробка установок генерації наносекундних імпульсів та дослідження їх характеристик.

Разом з тим, процеси формування таких імпульсів мають складний характер і визначаються сукупною дією елементів системи, включаючи джерело сигналу, імпульсний модуль та навантаження. Особливо важливу роль відіграють нелінійні процеси в резонансному генераторі, що істотно впливають на форму, тривалість та спектральні характеристики сигналу. Відсутність узагальненого математичного опису цих процесів ускладнює аналіз роботи установки та обґрунтування її параметрів.

Крім того, існує необхідність узгодженого опису процесів генерації, перетворення та передачі імпульсного сигналу в межах єдиної моделі, що дозволяє врахувати взаємозв'язок між параметрами вхідного сигналу, характеристиками резонансного контуру та властивостями сформованих наносекундних імпульсів. Це є важливим для забезпечення ефективності електромагнітного впливу та оптимізації режимів роботи установки.

Таким чином, актуальним є завдання розробки узагальненої математичної моделі процесів формування наносекундних імпульсів у системі електромагнітного знезараження зернової маси, яка враховує нелінійні властивості генератора та забезпечує комплексний опис сигналу в часовій і частотній областях.

### I. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Аналіз сучасних досліджень у галузі генерації імпульсних електромагнітних сигналів свідчить, що значна частина наукових робіт присвячена експериментальному вивченню імпульсних установок та їх впливу на біологічні об'єкти, зокрема процесам електропорації клітинних структур та знезараження сільськогосподарської продукції [1–3]. Водночас питання математичного опису процесів формування наносекундних імпульсів залишаються недостатньо дослідженими [2, 4]. Існуючі моделі, як правило, базуються на спрощених підходах до опису генераторів і не враховують у повному обсязі нелінійні властивості елементів, що визначають форму та спектр сигналу [4, 5]. Крім того, більшість досліджень орієнтована на аналіз окремих етапів формування імпульсів без комплексного врахування процесів генерації, перетворення та передачі сигналу в межах єдиної системи [3–5].

### II. МЕТА РОБОТИ

Метою роботи є дослідження математичної моделі процесів формування наносекундних імпульсів у системі електромагнітного знезараження зернової маси з урахуванням особливостей роботи резонансного генератора на основі напівпровідникового діода.

### III. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Для реалізації процесу електромагнітного знезараження зернових культур використовується спеціалізована установка, призначена для формування та дослідження наносекундних імпульсів високої напруги. Конструктивно установка являє собою сукупність функціонально взаємопов'язаних блоків, що забезпечують генерацію вхідного сигналу, його перетворення в імпульси заданої тривалості, передачу до об'єкта обробки та подальший аналіз параметрів сигналу. Основною особливістю даної системи є здатність формувати імпульси з надзвичайно малою тривалістю та високою амплітудою, що забезпечує ефективний електромагнітний вплив на мікробіологічні структури без суттєвого теплового навантаження на зерновий матеріал.

Виходячи з попередніх досліджень [6–9] можна сказати, що установка для знезараження складається з силового генератора, імпульсного генератора, засобів контролю (осцилографів) та допоміжних систем живлення і синхронізації.

На вході системи розташований силовий генератор, який формує початковий електричний сигнал із заданими параметрами (форма, частота, амплітуда). Сформований сигнал надходить до модуля

---

---

## ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

---

---

імпульсного генератора на основі напівпровідникового діода, де відбувається його перетворення у високовольтні наносекундні імпульси з крутими фронтами та малою тривалістю. Такий підхід дозволяє формувати високочастотні сигнали з необхідними амплітудно-частотними характеристиками за рахунок використання нелінійних властивостей діода та резонансних явищ у коливальному контурі.

Імпульсний сигнал передається через узгоджену лінію передачі (з'єднувальні кабелі) до робочої зони установки, де здійснюється безпосередній електромагнітний вплив на об'єкт обробки - зернову масу. При цьому важливим є забезпечення мінімальних втрат енергії та збереження форми імпульсу під час його поширення [10].

Для контролю параметрів сигналу в різних точках системи використовуються осцилографи, які підключаються до виходу генератора та до виходу імпульсного модуля або безпосередньо до навантаження. Це дозволяє здійснювати порівняльний аналіз вхідного та вихідного сигналів, а також оцінювати вплив елементів системи на їх параметри.

Живлення всіх функціональних блоків забезпечується джерелом живлення, а синхронізація роботи окремих вузлів реалізується за допомогою відповідних допоміжних модулів. Для підвищення надійності роботи системи передбачено елементи захисту від перенапруг та електромагнітних завад.

На рис. 1. зображено силову частину установки електромагнітного знезараження, яка забезпечує формування, підсилення та передачу наносекундних імпульсів до об'єкта обробки.

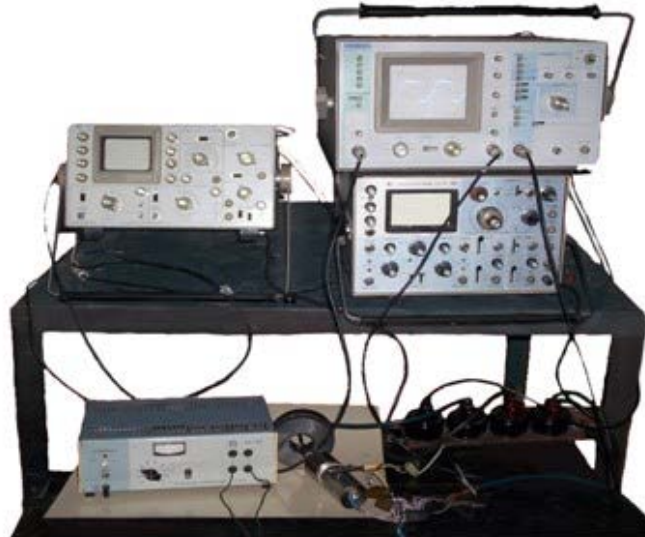


Рисунок 1 – Експериментальна установка генератора наносекундних імпульсів

Установка призначена для створення, аналізу та моделювання наносекундних імпульсів, які використовуються в багатьох сферах, таких як телекомунікації, радіолокація або дослідження фізичних явищ, пов'язаних з короткочасними електричними процесами, в нашому випадку для знезараження зернової маси. Для визначення раціональних параметрів проведення експерименту необхідно виконати математичний аналіз процесів формування наносекундних імпульсів. Такий аналіз можливо дозволить встановити взаємозв'язок між основними параметрами імпульсів, зокрема їх амплітудою, тривалістю, частотою повторення та формою, і ефективністю впливу на об'єкти знезараження. Дослідження цих залежностей дасть можливість оцінити вплив електрофізичних параметрів сигналу на мікробіологічні структури зернової маси та обґрунтувати вибір оптимальних режимів роботи установки.

Для математичного опису процесів функціонування установки генерації наносекундних імпульсів виконаємо розгляд основного елемнту установки, імпульсного генератора на основі напівпровідникового діода (рис. 2).

Основною генератора є LC-контур, доповнений нелінійним елементом - діодом із негативним диференціальним опором (тунельним або діодом Ганна), що забезпечує виникнення та підтримку автоколивань [11]. У цьому режимі діод компенсує втрати енергії в контурі, що забезпечує режим автоколивань та формування стійкого гармонічного або квазіімпульсного сигналу заданої частоти та амплітуди.

## ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО

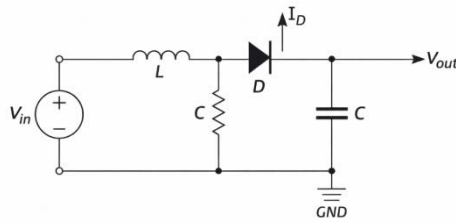


Рисунок 2 – Принципова електрична схема резонансного генератора імпульсів на основі діода:  $V_{in}$  - джерело вхідної напруги;  $L$  - індуктивність (формує резонанс);  $C$  - ємність (разом з  $L$  задає частоту);  $D$  - діод (тунельний або Ганна, нелінійний елемент);  $R$  - навантаження / втрати;  $V_{out}$  - вихідний сигнал

Математичний опис роботи такого генератора може бути представлений системою диференціальних рівнянь, що враховують взаємодію індуктивності, ємності та нелінійної характеристики діода:

$$\begin{cases} \frac{dI(t)}{dt} = \frac{1}{L}(V_{in}(t) - V_C(t)) \\ \frac{dV_C(t)}{dt} = \frac{1}{C}(I(t) - I_D(V_C(t))) \end{cases},$$

де  $I_D(V_C(t))$  - визначає нелінійну вольт-амперну характеристику діода.

Розв'язок цієї системи визначає форму та параметри вихідного сигналу генератора, який використовується як вхідний сигнал для подальшого формування наносекундних імпульсів. Система рівнянь є нелінійною, що обумовлює складну динаміку сигналу та наявність гармонічних складових.

Розглянемо вхідний сигнал, сформований функціональним генератором, який може бути представлений у вигляді базових математичних функцій, які описують його часові та спектральні характеристики [8]:

Якщо вхідний сигнал синусоїдальний:

$$V_{in}(t) = A_m \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_{in} t + \varphi_{in}), \quad (1)$$

де  $A_m$  - амплітуда вхідного сигналу,  $f_{in}$  - частота вхідного сигналу,  $\varphi_{in}$  - початкова фаза сигналу,  $t$  - час.

Якщо вхідний сигнал прямокутний (імпульсний):

$$V_{in}(t) = \begin{cases} A_m, & 0 \leq t \leq T_{on} \\ 0, & T_{on} \leq t \leq T_{off} \end{cases}, \quad (2)$$

де  $T_{on}$  - тривалість імпульсу,  $T_{off}$  - тривалість паузи між імпульсами.

Модуль імпульсного генератора здійснює перетворення вхідного сигналу з метою формування імпульсів наносекундної тривалості із заданими амплітудно-часовими характеристиками. Процес може бути описаний із використанням відповідних аналітичних функцій, зокрема віконних функцій або функції Гауса у випадку формування імпульсів, наближених до гаусової форми [12, 13]. Такий підхід дозволяє адекватно відобразити процес обмеження сигналу в часі та формування імпульсів із крутими фронтами і контрольованою тривалістю.

Для прямокутних імпульсів:

$$V_{imp}(t) = A_{imp} \cdot \text{rect}\left(\frac{t}{\tau_{imp}}\right), \quad (3)$$

де  $A_{imp}$  - амплітуда імпульсу,  $\tau_{imp}$  - тривалість наносекундного імпульсу.

$$\text{rect}(x) = \begin{cases} 1, & |x| \leq 1/2 \\ 0, & |x| \geq 1/2 \end{cases},$$

Для гаусових імпульсів:

$$V_{imp}(t) = A_{imp} \cdot \exp\left(\frac{-t^2}{2\sigma^2}\right), \quad (4)$$

де  $\sigma$  - параметр ширини гаусового імпульсу.

---

---

## ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

---

---

Важливим параметром імпульсного режиму роботи є частота повторення імпульсів  $f_{rep}$ , яка визначає інтенсивність впливу на об'єкт обробки [14]. Зазначена величина визначається як обернена до періоду повторення імпульсного сигналу і може бути записана у вигляді:

$$f_{rep} = \frac{1}{T_{imp}}, \quad (5)$$

де  $T_{imp}$  - період імпульсів, тобто час між початком двох послідовних імпульсів.

Зміна частоти повторення імпульсів безпосередньо впливає на сумарну енергію, що передається до об'єкта знезараження, а також на ефективність електромагнітного впливу на мікробіологічні структури зернової маси.

Сформовані наносекундні імпульси характеризуються широкосмуговим спектром, що обумовлено їх малою тривалістю у часовій області [8-11]. Така особливість забезпечує наявність значної кількості височастотних складових [15] у спектрі сигналу, що відіграє важливу роль у процесах електромагнітного впливу на об'єкти знезараження. При цьому спектральні характеристики сформованого сигналу визначаються не лише параметрами імпульсного модуля, але й властивостями резонансного генератора, зокрема його резонансною частотою та нелінійною динамікою діода, що впливає на гармонічний склад сигналу.

Спектральні характеристики сигналу можуть бути визначені за допомогою перетворення Фур'є [8,9], яке дозволяє встановити розподіл амплітуди сигналу в частотній області:

Для прямокутного імпульсу:

$$V_{out}(f) = A_{imp} \cdot \text{sinc}(\pi \cdot f \cdot \tau_{imp}), \quad (6)$$

де  $\text{sinc}(x) = \sin(x)/x$ .

Для гаусового імпульсу:

$$V_{out}(f) = A_{imp} \cdot \exp(-2\pi^2 \cdot f^2 \cdot \sigma^2), \quad (7)$$

Наступним кроком необхідно описати енергетичні характеристики. Енергія одного імпульсу  $E_{imp}$  можна оцінити як:

$$E_{imp} = \int_{-\infty}^{\infty} V_{imp}^2(t) dt, \quad (8)$$

Для прямокутного імпульсу енергія обчислюється за формулою:

$$E_{imp} = A_{imp}^2 \cdot \tau_{imp}, \quad (9)$$

Для гаусового імпульсу:

$$E_{imp} = A_{imp}^2 \cdot \sigma \sqrt{\pi}, \quad (10)$$

Ці математичні вирази описують роботу установки з точки зору генерації та аналізу наносекундних імпульсів, тобто модель для дослідження фізичних процесів формування сигналу, його перетворення та впливу на об'єкт обробки. Вона дозволяє оцінити часові та спектральні характеристики імпульсів, енергетичні параметри, а також ефективність їх впливу [11,16, 17] на мікробіологічні структури зернової маси.

Така модель є базою для проведення експериментальних вимірювань, оптимізації параметрів установки та прогнозування результатів обробки, забезпечуючи комплексне розуміння процесів генерації наносекундних імпульсів і їх взаємодії з об'єктами знезараження. Модель дозволяє передбачити поведінку імпульсів, їхні основні параметри та реакцію системи на зміну умов роботи, що корисно для налаштування та оптимізації установки. Математична модель установки повинна розглядатися як багаторівнева система, що включає як модель генерації сигналу (резонансний генератор), так і модель його подальшого перетворення у наносекундні імпульси та взаємодії з об'єктом обробки.

Отже, узагальнену математичну модель установки знезараження зерна можна представити у вигляді послідовності функціональних блоків, що описують формування, перетворення та вплив наносекундних імпульсів на об'єкт обробки.

Установка генерує вхідний сигнал  $V_{in}(t)$ , перетворює його в наносекундні імпульси  $V_{imp}(t)$  які передаються через кабель зі загасанням до осцилографа, де сигнал аналізується. Вхідний сигнал  $V_{in}(t)$  формується стандартним (функціональним) генератором та надходить до імпульсного модуля. У модулі імпульсного генератора на основі резонансного LC-контурі з діодом відбувається перетворення цього сигналу у вихідний сигнал  $V_{gen}(t)$ , який визначається розв'язком системи нелінійних диференціальних

---

---

## ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО

---

---

рівнянь генератора. Таким чином, він не є довільною функцією, а визначається параметрами генератора та описується як:

$$V_{in}(t) = V_{gen}(t),$$

де  $V_{gen}(t)$  - є розв'язком системи рівнянь генератора, що враховує параметри LC-контур та нелінійність діода. Це забезпечує узгодження моделей генерації та подальшого формування імпульсів у межах єдиного підходу.

Таким чином, у системі доцільно розрізнити два рівні формування сигналу: первинний сигнал  $V_{in}(t)$ , що генерується стандартним генератором, та сигнал  $V_{gen}(t)$ , сформований імпульсним модулем на основі резонансного генератора. Саме сигнал  $V_{gen}(t)$  використовується як вхідний для подальшого формування наносекундних імпульсів.

Процеси в установці описуються системою рівнянь:

Вхідний сигнал:

$$V_{in}(t) = A_{in} \cdot f_{in}(t), \quad (11)$$

де  $f_{in}(t)$  - нормована форма вхідного сигналу.

Імпульсний сигнал після перетворення:

$$V_{imp}(t) = A_{imp} \cdot g(t), \quad (12)$$

де  $g(t)$  - нормована форма імпульсу після перетворення.

Загасання сигналу при передачі:

$$V_{out}(t) = V_{imp}(t) \cdot e^{-\alpha(f)d}, \quad (13)$$

Енергія імпульсу:

$$E_{imp} = \int_{-\infty}^{\infty} V_{imp}^2(t) dt, \quad (14)$$

Спектр сигналу:

$$V_{out}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} V_{out}(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt, \quad (15)$$

Слід зазначити, що запропонована модель (11)–(15) базується на ряді припущень, зокрема не враховує частотну залежність коефіцієнта загасання та можливі нелінійні ефекти в елементах системи.

Отже, ці рівняння описують роботу основних компонентів лабораторної установки для генерації та аналізу наносекундних імпульсів. Вони відображують взаємодію ключових функціональних елементів системи та забезпечує цілісне уявлення про процеси, що відбуваються під час її функціонування. Такий підхід забезпечує узгоджене представлення фізичних процесів у межах єдиної формалізованої структури.

Запропонована математична модель (11)–(15) комплексно описує процеси генерації, формування, передачі з урахуванням загасання та спектрального аналізу наносекундних імпульсів і може бути використана для чисельного моделювання у сучасних програмних середовищах, зокрема MATLAB або PSCAD.

Для верифікації розробленої математичної моделі виконано чисельне моделювання процесу формування наносекундних імпульсів у середовищі MATLAB. Моделювання здійснено для гаусового імпульсу з амплітудою  $A = 1$ , параметром ширини  $\sigma = 5$  нс та часовим інтервалом аналізу 200 нс при кількості відліків  $N = 8192$ . Вибір зазначених параметрів обумовлений необхідністю забезпечення достатньої часової локалізації імпульсу, високої частотної роздільної здатності спектра та чисельної стійкості перетворення Фур'є. Обрана тривалість імпульсу забезпечує формування широкосмугового спектра, що поширюється до сотень мегагерц, що узгоджується з теоретичними положеннями щодо наносекундних сигналів.

Результати моделювання наведено на рис. 3 та рис. 4, де представлено часову форму наносекундного імпульсу та його спектральний склад відповідно. Проведений аналіз підтверджує узгодженість між аналітичними залежностями та результатами чисельного моделювання.

## ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

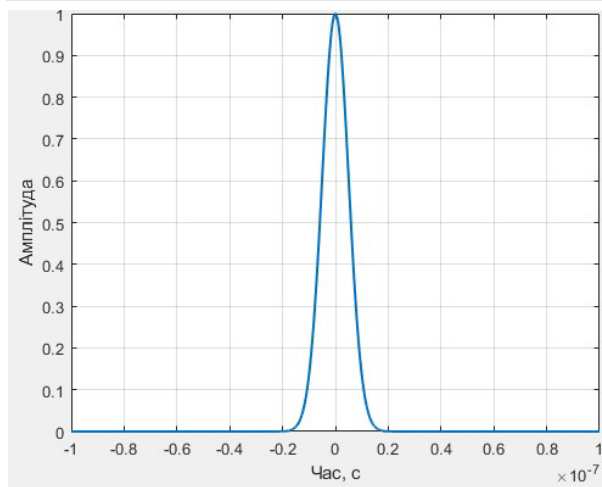


Рисунок 3 – Часова форма наносекундного імпульсу

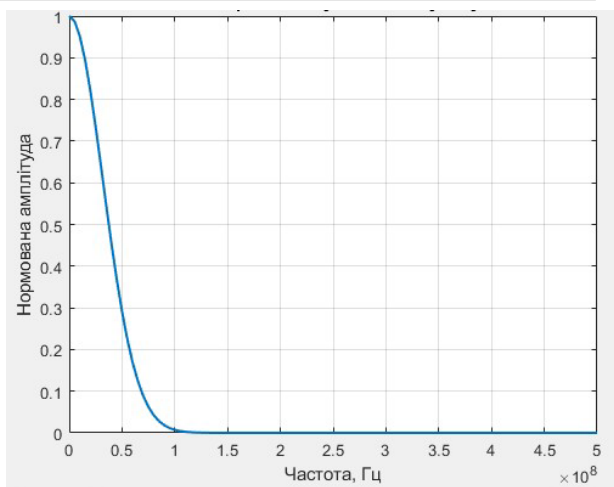


Рисунок 4 – Спектральні характеристики наносекундного імпульсу

На рис. 3 представлено результат чисельного моделювання наносекундного імпульсу у часовій області. Отриманий сигнал має гаусову форму та характеризується симетрією відносно моменту часу  $t = 0$ . Тривалість імпульсу становить одиниці наносекунд, що відповідає заданим параметрам моделювання, при цьому амплітуда сигналу нормована.

На рис. 4 наведено спектральні характеристики змодельованого сигналу, отримані із застосуванням швидкого перетворення Фур'є. Спектр має максимум у області нульової частоти та характеризується монотонним спаданням амплітуди зі зростанням частоти. Спостерігається широкий частотний діапазон сигналу, що відповідає наносекундній тривалості імпульсу. Така залежність відображає відомий зв'язок між часовими та спектральними характеристиками сигналу, згідно з яким зменшення тривалості імпульсу призводить до розширення його спектра.

Отримані результати чисельного моделювання підтверджують узгодженість між аналітичними залежностями та спектрально-часовими характеристиками сигналу, що свідчить про адекватність запропонованої математичної моделі.

Основні математичні співвідношення, що лежать в основі моделі, забезпечують можливість аналізу, налаштування та оптимізації параметрів установки. Застосування моделі дозволить досліджувати вплив параметрів сигналу та характеристик елементів системи на кінцеві показники роботи установки, що є важливим для обґрунтованого вибору її раціональних режимів функціонування.

Запропонована математична модель є основою для подальших експериментальних і теоретичних досліджень, спрямованих на вдосконалення параметрів установки та підвищення точності отриманих результатів.

### ВИСНОВКИ

Розроблено узагальнену математичну модель установки генерації наносекундних імпульсів, призначеної для системи електромагнітного знезараження зернової маси. Запропонована модель забезпечує формалізований опис основних фізичних процесів, що відбуваються в установці, а саме: генерації вхідного сигналу, його перетворення в імпульсному модулі, передачі до об'єкта обробки та подальшого спектрально-часового аналізу.

Основа розробленої моделі становить послідовність взаємопов'язаних функціональних блоків, що відображають структуру реальної лабораторної установки. У межах єдиного математичного підходу описано роботу функціонального генератора, резонансного генератора на основі LC-контур з нелінійним діодом, блоку формування наносекундних імпульсів, каналу передачі сигналу з урахуванням загасання та засобів контролю сигналу. Це дозволило сформулювати цілісне уявлення про принцип функціонування установки як єдиної електротехнічної системи.

Сформовано систему аналітичних залежностей, яка описує часові, спектральні та енергетичні характеристики сигналів на різних етапах роботи установки. Запропонована модель поєднує опис процесів генерації, перетворення та передачі наносекундних імпульсів, що створює основу для подальшого чисельного моделювання та верифікації в сучасних програмних середовищах.

---

---

## ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО

---

---

Результати чисельного моделювання в середовищі MATLAB підтвердили працездатність та адекватність розробленої математичної моделі, а також її відповідність фізичній сутності процесів формування наносекундних імпульсів у часовій і частотній областях.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. V. Novickij, A. Grainys, E. Lastauskienė, R. Kananavičiūtė, D. Pamedytytė, L. Kalėdienė, J. Novickij and D. Miklavčič, “Pulsed electromagnetic field assisted in vitro electroporation: A pilot study,” *Scientific Reports*, vol. 6, p. 33537, Sep. 2016, doi: 10.1038/srep33537.
2. V. Novickij, A. Grainys, E. Lastauskienė, R. Kananavičiūtė, D. Pamedytytė, L. Kalėdienė, J. Novickij and D. Miklavčič, “Pulsed electromagnetic field assisted in vitro electroporation: A pilot study,” *Scientific Reports*, vol. 6, p. 33537, Sep. 2016, doi: 10.1038/srep33537.
3. P. Butkus, A. Murauskas, S. Tolvaišienė and V. Novickij, “Concepts and capabilities of in-house built nanosecond pulsed electric field (nsPEF) generators for electroporation: State of art,” *Applied Sciences*, vol. 10, no. 12, p. 4244, 2020, doi: 10.3390/app10124244.
4. M. Abadi, M. H. Marzebali, V. Abolghasemi and H. Anisi, “High-voltage pulse generators for electroporation applications: A systematic review,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 1–1, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3184015.
5. V. Novickij, N. Rembiałkowska, W. Szlasa and J. Kulbacka, “Does the shape of the electric pulse matter in electroporation?” *Frontiers in Oncology*, vol. 12, p. 958128, Sep. 2022, doi: 10.3389/fonc.2022.958128.
6. В. Мардзявко та А. Руденко, “Визначення умов стійкості електронних потоків в напівпровідникових пристроях у складі імпульсних генераторів,” *Modern Engineering and Innovative Technologies*, вип. 31, ч. 1, с. 23–31, Feb. 2024, doi: 10.30890/2567-5273.2024-31-00-043.
7. В. А. Мардзявко та А. Руденко, “Теоретичні та практичні аспекти застосування генераторів НВЧ для знезараження зернових культур,” *Вісник Херсонського національного технічного університету*, т. 90, № 3, с. 85–94, 2024, doi: 10.35546/kntu2078-4481.2024.3.11.
8. X. L. Yao, T. Y. Lin and J. L. Chen, “Research for high-voltage nanosecond rectangular pulse generator,” *Advanced Materials Research*, vols. 718–720, pp. 1691–1695, 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.718-720.1691.
9. J. Mao, X. Wang, D. Tang, H. Lv, C. Li, Y. Shao and L. Qin, “A compact, low jitter, nanosecond rise time, high voltage pulse generator with variable amplitude,” *Review of Scientific Instruments*, vol. 83, no. 7, p. 075112, 2012, doi: 10.1063/1.4737146.
10. C. Zhao, Q. Zou, X. Ren *et al.*, “Development of nanosecond spike pulse power supply for electrochemical micromachining,” *Scientific Reports*, vol. 13, p. 22833, 2023, doi: 10.1038/s41598-023-48793-z.
11. Л. Вахоніна, В. Мардзявко та А. Руденко, “Резонансний генератор імпульсів на основі діода,” *Вісник Херсонського національного технічного університету*, т. 1, № 92, с. 39–48, 2025, doi: 10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.
12. L. Howard and K. Daneshvar, “Nanosecond-pulse generator for laser diodes,” *Review of Scientific Instruments*, vol. 60, no. 10, pp. 1–6, 1989, doi: 10.1063/1.1140528.
13. A. Valizade, P. Rezaei and A. A. Orouji, “A compact reconfigurable sub-nanosecond pulse generator with pulse-shape modulation,” *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, vol. 9, no. 4, pp. 741–745, 2017, doi: 10.1017/S1759078716000921.
14. Y. Zhu and L. Wang, “Design and implementation of nanosecond pulse generator based on reconfiguration PLL in FPGA,” in *Proc. ESAC*, 2015, pp. 78–82, doi: 10.2991/esac-15.2015.78.
15. Z. Zhu, Y. Yang, L. Hu *et al.*, “Bipolar ultra-wide spectrum pulse generator based on GaAs photoconductive switches,” *High Power Laser and Particle Beams*, vol. 36, p. 115007, 2024, doi: 10.11884/HPLPB202436.240238.
16. L. Pang, Q. Zhang, B. Ren and K. He, “A compact repetitive high-voltage nanosecond pulse generator for the application of gas discharge,” *Review of Scientific Instruments*, vol. 82, no. 4, p. 043504, 2011, doi: 10.1063/1.3572265.
17. N. Kosulina, M. Chorna, I. Boroday, O. Avrunin and V. Semenets, “Analysis of characteristics of semi-disc leucosapphire resonator with electronic frequency tuning,” *Telecommunications and Radio Engineering (English translation of Elektrosvyaz and Radiotekhnika)*, vol. 81, no. 6, pp. 1–14, 2022, doi: <https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.2022037910>

---

---

## ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

---

---

### REFERENCES

1. V. Novickij, A. Grainys, E. Lastauskienė, R. Kananavičiūtė, D. Pamedytytė, L. Kalėdienė, J. Novickij and D. Miklavčič, “Pulsed electromagnetic field assisted in vitro electroporation: A pilot study,” *Scientific Reports*, vol. 6, p. 33537, Sep. 2016, doi: 10.1038/srep33537.
2. V. Novickij, A. Grainys, E. Lastauskienė, R. Kananavičiūtė, D. Pamedytytė, L. Kalėdienė, J. Novickij and D. Miklavčič, “Pulsed electromagnetic field assisted in vitro electroporation: A pilot study,” *Scientific Reports*, vol. 6, p. 33537, Sep. 2016, doi: 10.1038/srep33537.
3. P. Butkus, A. Murauskas, S. Tolvaišienė and V. Novickij, “Concepts and capabilities of in-house built nanosecond pulsed electric field (nsPEF) generators for electroporation: State of art,” *Applied Sciences*, vol. 10, no. 12, p. 4244, 2020, doi: 10.3390/app10124244.
4. M. Abadi, M. H. Marzebali, V. Abolghasemi and H. Anisi, “High-voltage pulse generators for electroporation applications: A systematic review,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 1–1, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3184015.
5. V. Novickij, N. Rembiałkowska, W. Szlasa and J. Kulbacka, “Does the shape of the electric pulse matter in electroporation?” *Frontiers in Oncology*, vol. 12, p. 958128, Sep. 2022, doi: 10.3389/fonc.2022.958128.
6. V. Mardzyavko and A. Rudenko, “Determination of stability conditions for electron flows in semiconductor devices as part of pulse generators,” *Modern Engineering and Innovative Technologies*, vol. 31, part 1, pp. 23–31, Feb. 2024, doi: 10.30890/2567-5273.2024-31-00-043.
7. V. A. Mardzyavko and A. Rudenko, “Theoretical and practical aspects of the use of microwave generators for disinfection of grain crops,” *Bulletin of the Kherson National Technical University*, vol. 90, no. 3, pp. 85–94, 2024, doi: 10.35546/kntu2078-4481.2024.3.11.
8. X. L. Yao, T. Y. Lin and J. L. Chen, “Research for high-voltage nanosecond rectangular pulse generator,” *Advanced Materials Research*, vols. 718–720, pp. 1691–1695, 2013, doi: 10.4028/[www.scientific.net/AMR.718-720.1691](http://www.scientific.net/AMR.718-720.1691).
9. J. Mao, X. Wang, D. Tang, H. Lv, C. Li, Y. Shao and L. Qin, “A compact, low jitter, nanosecond rise time, high voltage pulse generator with variable amplitude,” *Review of Scientific Instruments*, vol. 83, no. 7, p. 075112, 2012, doi: 10.1063/1.4737146.
10. C. Zhao, Q. Zou, X. Ren *et al.*, “Development of nanosecond spike pulse power supply for electrochemical micromachining,” *Scientific Reports*, vol. 13, p. 22833, 2023, doi: 10.1038/s41598-023-48793-z.
11. L. Vakhonina, V. Mardzyavko, and A. Rudenko, “Resonant pulse generator based on a diode,” *Bulletin of the Kherson National Technical University*, vol. 1, no. 92, pp. 39–48, 2025, doi: 10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.
12. L. Howard and K. Daneshvar, “Nanosecond-pulse generator for laser diodes,” *Review of Scientific Instruments*, vol. 60, no. 10, pp. 1–6, 1989, doi: 10.1063/1.1140528.
13. A. Valizade, P. Rezaei and A. A. Orouji, “A compact reconfigurable sub-nanosecond pulse generator with pulse-shape modulation,” *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, vol. 9, no. 4, pp. 741–745, 2017, doi: 10.1017/S1759078716000921.
14. Y. Zhu and L. Wang, “Design and implementation of nanosecond pulse generator based on reconfiguration PLL in FPGA,” in *Proc. ESAC*, 2015, pp. 78–82, doi: 10.2991/esac-15.2015.78.
15. Z. Zhu, Y. Yang, L. Hu *et al.*, “Bipolar ultra-wide spectrum pulse generator based on GaAs photoconductive switches,” *High Power Laser and Particle Beams*, vol. 36, p. 115007, 2024, doi: 10.11884/HPLPB202436.240238.
16. L. Pang, Q. Zhang, B. Ren and K. He, “A compact repetitive high-voltage nanosecond pulse generator for the application of gas discharge,” *Review of Scientific Instruments*, vol. 82, no. 4, p. 043504, 2011, doi: 10.1063/1.3572265.
17. N. Kosulina, M. Chorna, I. Boroday, O. Avrunin and V. Semenets, “Analysis of characteristics of semi-disc leucosapphire resonator with electronic frequency tuning”, *Telecommunications and Radio Engineering (English translation of Elektrosvyaz and Radiotekhnika)*, vol. 81, no. 6, pp. 1–14, 2022, doi: <https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.2022037910>

---

---

## ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО

---

---

Дата надходження: 30.01.2026

Дата прийняття до друку після рецензування: 28.02.2026

Дата публікації: 18.06.2026

Ця робота ліцензується відповідно до  
[Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

**КУНДЕНКО МИКОЛА ПЕТРОВИЧ** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, 61002, Україна,  
***e-mail:*** [Mykola.Kundenko@khipi.edu.ua](mailto:Mykola.Kundenko@khipi.edu.ua), <https://orcid.org/0000-0002-5841-4367>

**МАРДЗЯВКО ВІТАЛІЙ АНАТОЛІЙОВИЧ** – асистент, Миколаївський національний аграрний університет, м. Миколаїв, 54000, Україна, ***e-mail:*** [mardzavko@mnaeu.edu.ua](mailto:mardzavko@mnaeu.edu.ua),  
<https://orcid.org/0000-0001-7327-9215>

**РУДЕНКО АНДРІЙ ЮРІЙОВИЧ** – асистент, Миколаївський національний аграрний університет, м. Миколаїв, 54000, Україна, ***e-mail:*** [rudenkoau@mnaeu.edu.ua](mailto:rudenkoau@mnaeu.edu.ua), <https://orcid.org/0000-0002-5103-6412>

**МАРДЗЯВКО КАТЕРИНА ОЛЕКСАНДРІВНА** – канд. техн. наук, асистент, Миколаївський національний аграрний університет, м. Миколаїв, 54000, Україна,  
***e-mail:*** [yablunovskako@mnaeu.edu.ua](mailto:yablunovskako@mnaeu.edu.ua), <https://orcid.org/0000-0002-5215-1594>

**МЕЛЬНИК ВАЛЕНТИН ВАЛЕНТИНОВИЧ** – аспірант, Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, 61166, Україна, ***e-mail:*** [valentyn.melnyk@nure.ua](mailto:valentyn.melnyk@nure.ua),  
<https://orcid.org/0000-0001-9348-8444>

Mykola KUNDENKO, Vitalii MARDZIAVKO, Andrii RUDENKO, Kateryna MARDZIAVKO, Valentyn MELNYK

### MODELING OF A DIODE-BASED RESONANT PULSE GENERATOR IN A NANOSECOND SIGNAL FORMATION SYSTEM

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine

Mykolaiv National Agrarian University, Mykolaiv, Ukraine

Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine