

МАТЕМАТИЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ФОРМУВАННЯ НАНОСЕКУНДНИХ ІМПУЛЬСІВ В УСТАНОВЦІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ЗНЕЗАРАЖЕННЯ

Мардзявко В.А., асистент

Миколаївський національний аграрний університет
<http://orcid.org/0000-0001-7327-9215>

Руденко А.Ю., асистент

Миколаївський національний аграрний університет
<http://orcid.org/0000-0002-5103-6412>

Анотація: У роботі розглянуто процеси формування та передачі наносекундних імпульсів високої напруги в установці електромагнітного знезараження зернових культур. Розроблено математичну модель, що описує генерацію, поширення та загасання імпульсів у системі «генератор – лінія передачі – об’єкт обробки» з урахуванням їх часових, спектральних та енергетичних характеристик. Встановлено вплив параметрів імпульсів на ефективність електромагнітного впливу на мікробіологічні структури зерна. Запропонований підхід дозволяє визначати раціональні режими роботи установки та підвищувати ефективність процесу знезараження.

Ключові слова: наносекундні імпульси, електромагнітне знезараження, зернові культури, математичне моделювання, високовольтні імпульси, спектральний аналіз, енергетичні характеристики, імпульсний генератор.

Вступ. Сучасні технології обробки та зберігання зернових культур потребують ефективних методів знезараження, які забезпечують знищення мікробіологічних забруднень без погіршення якості продукції. Одним із перспективних напрямів є електромагнітне знезараження із використанням наносекундних імпульсів високої напруги, що дозволяє здійснювати вплив на мікроорганізми без застосування хімічних реагентів [1]. Ефективність такого процесу визначається параметрами імпульсів – амплітудою, тривалістю, формою та частотою повторення, а також умовами їх формування та передачі в системі «генератор – лінія передачі – об’єкт обробки» [1]. Через наявність складних електрофізичних процесів у цих елементах виникає необхідність у розробці математичної моделі, яка дозволяє описати часові, спектральні та енергетичні характеристики імпульсів і встановити їх вплив на ефективність знезараження.

Метою роботи є аналіз математичної моделі процесів формування і передачі наносекундних імпульсів високої напруги в установці електромагнітного знезараження зернових культур.

Результат дослідження. Ефективність електромагнітного знезараження зернових культур визначається параметрами наносекундних імпульсів високої напруги, зокрема їх амплітудою, тривалістю, формою та частотою повторення [2]. Формування таких імпульсів супроводжується складними електрофізичними

процесами у генераторі, лінії передачі та навантаженні, що зумовлює необхідність їх математичного опису з урахуванням часових, спектральних та енергетичних характеристик.

Структура установки електромагнітного знезараження, яка реалізує зазначені процеси формування та передачі імпульсів, наведена на рис. 1. Вона відображає взаємозв'язок основних функціональних блоків системи, включаючи генератор сигналу, імпульсний модуль, лінію передачі, об'єкт обробки та засоби контролю параметрів.

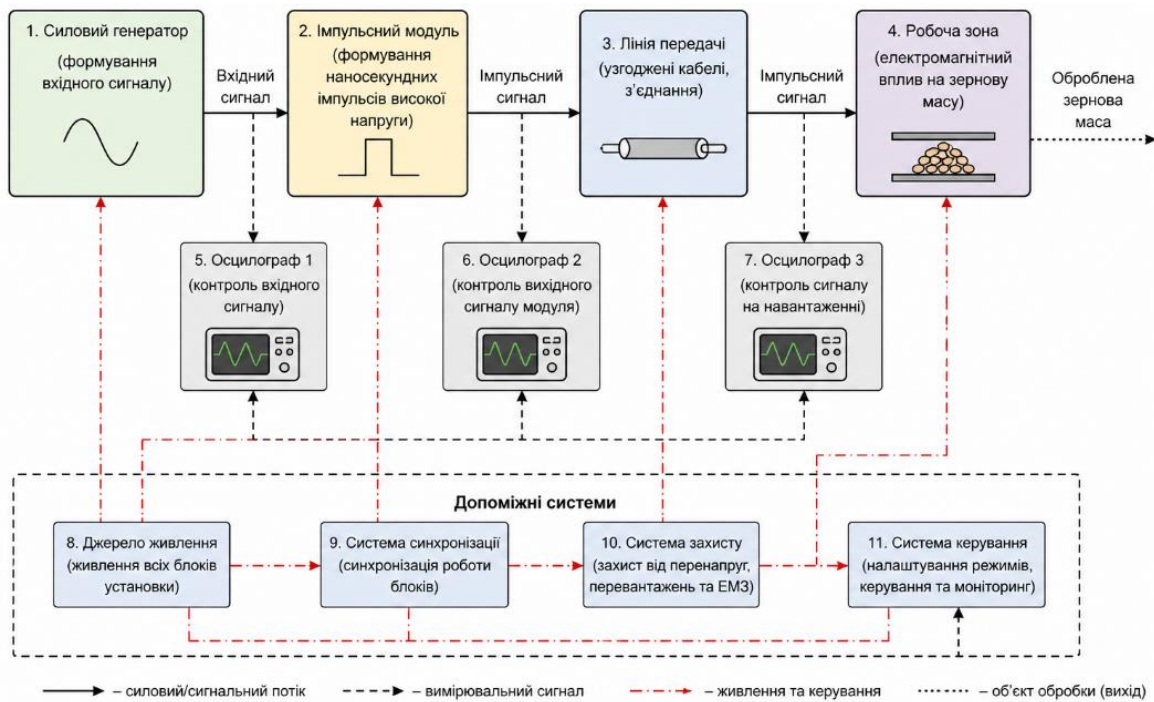


Рисунок 1 – Структурна схема установки електромагнітного знезараження зернових культур

Вхідний сигнал установки може бути представлений у вигляді гармонічної або імпульсної функції, що визначається виразами (1), (2), а процес формування наносекундних імпульсів у модулі перетворення описується аналітичними залежностями для прямокутних та гаусових імпульсів (3), (4).

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

де A_{in} - амплітуда вхідного сигналу, f_{in} - частота вхідного сигналу, φ_{in} - початкова фаза сигналу, t - час.

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

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

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

де A_{imp} - амплітуда імпульсу, τ_{imp} - тривалість наносекундного імпульсу.

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

Частота повторення імпульсів визначається співвідношенням (5) та безпосередньо впливає на інтенсивність електромагнітного впливу на об'єкт обробки.

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

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

Сформовані імпульси характеризуються широкосмуговим спектром, що зумовлено їх малою тривалістю, і описуються за допомогою перетворення Фур'є [3]:

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

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

При цьому наявність височастотних складових забезпечує ефективний вплив на мікробіологічні структури зернової маси. Енергетичні параметри імпульсів визначаються виразами (8)–(10) і дозволяють оцінити ефективність передачі енергії до об'єкта знезараження.

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

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

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

Суттєвий вплив на форму та амплітуду імпульсів має загасання сигналу в лінії передачі, що описується експоненціальною залежністю (11), а також узгодження елементів системи.

$$V_{out}(t) = V_{imp}(t) \cdot e^{-\alpha(f)d}, \quad (11)$$

$$E_{imp} = \int_{-\infty}^{\infty} V_{imp}^2(t) dt, \quad (12)$$

$$V(f) = \int_{-\infty}^{\infty} V_{out}(t) \cdot e^{-2\pi ift} dt, \quad (13)$$

Узагальнена математична модель процесів формування та передачі імпульсів представлена системою рівнянь (11)–(13), яка описує генерацію, перетворення, поширення сигналу та його спектральні й енергетичні характеристики.

Запропонована модель дозволяє встановити взаємозв'язок між параметрами імпульсів і ефективністю електромагнітного знезараження, а також визначити раціональні режими роботи установки. Її використання забезпечує можливість чисельного моделювання процесів формування наносекундних

імпульсів, оптимізації параметрів сигналу та підвищення ефективності обробки зернових культур.

Висновок. Ефективність електромагнітного знезараження зернових культур визначається параметрами наносекундних імпульсів високої напруги (амплітуда, тривалість, форма та частота повторення). Розроблена математична модель описує процеси генерації, передачі та загасання імпульсів у системі «генератор – лінія передачі – навантаження» та враховує їх часові, спектральні й енергетичні характеристики. Встановлено, що зменшення тривалості імпульсів забезпечує розширення спектра та підвищує ефективність впливу на мікробіологічні структури зерна, а узгодження елементів установки зменшує втрати енергії. Запропонований підхід дозволяє оптимізувати параметри імпульсів і підвищити ефективність знезараження.

Список використаних джерел

1. Мардзявко В., Руденко А. Визначення умов стійкості електронних потоків в напівпровідникових пристроях у складі імпульсних генераторів. *International periodic scientific journal "Modern engineering and innovative technologies"* Issue №31. Part 1. February 2024. P. 23-31. <https://doi.org/10.30890/2567-5273.2024-31-00-043>
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. Yao, X.L.; Lin, T.Y.; Chen, J.L. Research for High-Voltage Nanosecond Rectangular Pulse Generator. *Advanced Materials Research* 2013, 718–720, 1691–1695. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.718-720.1691>

Abstract: The paper considers the processes of formation and transmission of high-voltage nanosecond pulses in an electromagnetic disinfection installation for grain crops. A mathematical model has been developed that describes the generation, propagation and attenuation of pulses in the system “generator – transmission line – processing object” taking into account their time, spectral and energy characteristics. The influence of pulse parameters on the effectiveness of electromagnetic influence on microbiological grain structures has been established. The proposed approach allows determining rational operating modes of the installation and increasing the efficiency of the disinfection process.

Keywords: nanosecond pulses, electromagnetic disinfection, grain crops, mathematical modeling, high-voltage pulses, spectral analysis, energy characteristics, pulse generator.