

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

## ТЕОРЕТИЧНІ ТА ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ ЗАСТОСУВАННЯ ГЕНЕРАТОРІВ НВЧ ДЛЯ ЗНЕЗАРАЖЕННЯ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР

Дослідження присвячено оцінці ефективності використання мікрохвильового випромінювання для знезараження зернових культур від мікроорганізмів та шкідників. Актуальність цієї роботи зумовлена необхідністю розробки безпечних та ефективних альтернатив традиційним методам захисту зерна. У експерименті використовувалася мікрохвильовий генератор, що працює на частоті 2,45 ГГц. Результати дослідження показали, що 15-хвилинна обробка зерна мікрохвилями забезпечує знищення понад 90% спор грибів родів *Aspergillus* та *Fusarium*. Для боротьби з зерною вошакою (*Sitophilus granarius*) було встановлено, що нагрівання до температури 55°C протягом 10 хвилин призводить до загибелі 89% шкідників. Порівняно з традиційними пестицидами, які забезпечують знищення шкідників лише на 40% за 30 хвилин, мікрохвильова обробка виявилася більш ефективною та безпечною. Економічний аналіз показав, що вартість мікрохвильової обробки зерна становить близько 50 грн/т, що майже вдвічі нижча за вартість традиційних методів дезінфекції. Крім того, мікрохвильовий метод є більш екологічним, оскільки не передбачає використання шкідливих хімічних речовин. Наголошено, що мікрохвильова технологія має значний потенціал для застосування в сільському господарстві. Завдяки здатності ефективно знищувати шкідників та збудників хвороб, мікрохвильові установки можуть бути використані для знезараження зерна після збору врожаю. Це дозволить зменшити втрати врожаю та підвищити якість продукції. Порівняно з попередніми розробками в галузі мікрохвильової обробки, запропонований метод характеризується більш високою ефективністю, нижчими операційними витратами (зниження на 30%) та екологічністю. У цій статті розглянуто обмеження традиційних методів стерилізації разом із їхніми перевагами, а також переваги застосування мікрохвильової технології для збереження екосистем та здоров'я користувачів. Окрім цього, наведено технічні характеристики, зокрема показники потужності та розміщення джерел випромінювання, які впливають на ефективність стерилізації за допомогою мікрохвильового джерела. Автори роблять висновок, що мікрохвильова технологія має перспективу застосування в сільському господарстві. Це означає, що такі генератори можуть бути використані аграріями для знезараження продукції після збирання врожаю, дозволяючи знизити популяцію шкідників до 90% за короткий період, що, відповідно, зменшує ризик зараження продукції. У порівнянні з попередніми методами мікрохвильової стерилізації, сучасний підхід дозволяє зменшити операційні витрати на 30%, підвищити якість кінцевого продукту та зберегти екологічну чистоту.

**Ключові слова:** електромагнітні хвилі, мікрохвильова обробка, сільське господарство, стерилізація, патогени.

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

## THEORETICAL AND PRACTICAL ASPECTS OF USING MICROWAVE GENERATORS FOR GRAIN CROPS DISINFECTATION

The study is devoted to evaluating the effectiveness of microwave radiation for disinfecting grain crops from microorganisms and pests. The relevance of this work is due to the need to develop safe and effective alternatives to traditional methods of grain protection. A household microwave oven operating at a frequency of 2.45 GHz was

used in the experiment. The results of the study showed that a 15-minute microwave treatment of grain ensures the destruction of more than 90% of fungal spores of the genera *Aspergillus* and *Fusarium*. To combat the grain louse (*Sitophilus granarius*), it was found that heating to a temperature of 55°C for 10 minutes leads to the death of 89% of pests. Compared to conventional pesticides, which only kill 40% of the pests in 30 minutes, microwave treatment proved more effective and safer. An economic analysis showed that the cost of microwave treatment of grain is about 50 UAH/t, which is almost twice lower than the cost of traditional disinfection methods. In addition, the microwave method is more environmentally friendly, as it does not involve harmful chemicals. It is noted that microwave technology has significant potential for use in agriculture. Due to the ability to effectively destroy pests and pathogens, microwave installations can be used to disinfect grain after harvesting. This will reduce crop losses and improve product quality. Compared to previous developments in microwave processing, the proposed method is characterised by higher efficiency, lower operating costs (30% reduction) and environmental friendliness. This article discusses the limitations of traditional sterilisation methods, their advantages, and the benefits of using microwave technology to preserve ecosystems and user health. In addition, technical characteristics, such as power and placement of radiation sources, that affect the effectiveness of microwave sterilisation are presented. The authors conclude that microwave technology has the potential to be used in agriculture. Farmers can use such generators to disinfect produce after harvesting, reducing the pest population by up to 90% in a short period and reducing the risk of product contamination. Compared to previous methods of microwave sterilisation, the modern approach reduces operating costs by 30%, improves the quality of the final product and preserves environmental friendliness.

**Key words:** electromagnetic waves, microwave processing, agriculture, sterilization, pathogens.

### Постановка проблеми

Удосконалення сільськогосподарських технологій залежить від багатьох факторів, серед яких одним із найскладніших є забезпечення безпечного та якісного виробництва зерна. Доведено, що використання мікрохвильових генераторів електромагнітного випромінювання (ГЕМВ) на різних стадіях зберігання зернової продукції є ефективним засобом боротьби зі шкідниками та мікроорганізмами. Зокрема, нещодавні дослідження продемонстрували, що мікрохвильове випромінювання на частоті 2,45 ГГц протягом 15 хвилин здатне знизити поширення грибів *Aspergillus* на 92%, а грибів *Fusarium* – на 88% у зернових культурах [5].

Мікрохвильову обробку рекомендується застосовувати в тих випадках, коли хімічні засоби боротьби зі шкідниками виявляються неефективними, як, наприклад, в інтегрованій системі управління шкідниками (ІРМ). За наявними даними, вона знищує приблизно 90% популяції шкідника *Sitophilus granarius*, поширеного у зернових сховищах, протягом 10 хвилин, що є суттєвою перевагою порівняно з іншими методами. Для порівняння, хімічні методи знищують не більше ніж 40% популяції того ж шкідника за 30 хвилин.

Такі результати свідчать про те, що мікрохвильові генератори допомагають не лише зменшити втрати продовольчого зерна від шкідників при зберіганні, які можуть сягати 30% врожаю, але й сприяють підвищенню безпеки кінцевого продукту, усуваючи необхідність у хімічних консервантах. Отже, мікрохвильова обробка пропонує найкращі перспективи у підвищенні безпеки та якості лущеного зерна. Тому зрозуміло, що існує нагальна потреба в пошуку ефективних методів знезараження зерна. Наприклад, використання пристроїв мікрохвильового діапазону (тобто електромагнітного випромінювання надвисокої частоти) пропонує інноваційний підхід у боротьбі з мікроорганізмами.

Однією з ключових проблем, що перешкоджають трансформації сільськогосподарської системи на краще, є неефективність існуючих методів знезараження продуктів харчування, які включають хімічну дезінфекцію. Наприклад, пестициди, що використовуються для боротьби з комахами та бур'янами, негативно впливають на поживні якості зерна та спричиняють забруднення харчових продуктів, що становить загрозу для здоров'я споживачів. За оцінками, шкідники та мікотоксини, такі як *Aspergillus* і *Fusarium*, здатні виробляти токсичні речовини, спричиняють втрати понад 30% річного врожаю.

Ці ортодоксальні процедури також сприяють розвитку резистентності у шкідників, і тому з часом вони стають менш корисними. Наприклад, шкідники *Sitophilus granarius* легко переживуть хімічні пестициди після кількох вегетаційних сезонів хімічних обробок.

Таким чином, існує нагальна наукова та гуманітарна потреба в нових технологіях, які не лише зменшать рівень патогенів, але й збережуть якість продуктів харчування. Мікрохвильові генератори можуть стати такою технологією, проте їх вплив на фізичні та хімічні характеристики зерна має бути ретельно оцінений. Необхідно встановити параметри обробки, які забезпечать максимальну ефективність дезінфекції без шкоди для якості зерна.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Нещодавно проведені додаткові дослідження підтвердили придатність мікрохвильової обробки для промислового та комерційного використання, зокрема, для післязбиральної обробки зернових. Лабораторні тести, наприклад, показали, що біологічні матеріали, оброблені мікрохвильовою установкою (на частоті 2,45 ГГц протягом п'ятнадцяти хвилин, здатні на 90% дезактивувати шкідливі грибки, такі як *Aspergillus* і *Fusarium*, серед інших. Інші дослідження показали, що застосування мікрохвильової обробки дозволяє за короткий час досягти

досить низької щільності, наприклад, шкідників *Sitophilus granarius*. Ці результати дають надію на те, що використання мікрохвильових технологій підвищить безпеку та якість зерна, що зберігається на зерносховищах. В іншому прикладі, дослідження вказані в роботі [1] вказують на те, що окрім переробки зерна, необхідно встановити відповідні генератори, які працюють на частоті та потужності випромінювання вище 20 ГГц. Крім того, Кунденко М. П. та ін. [2] більш інтенсивно досліджували вплив мікрохвильового та радіочастотного випромінювання на зовнішню структуру зерен. Звичайно, було показано, що мікрохвилі не тільки корисні для зменшення бактеріального забруднення зерна, але й сприяють деяким видам діяльності, таким як клітинний метаболізм, що покращує якість зерна. Такі дані демонструють виражений позитивний вплив мікрохвильових систем на посіви зернових культур.

У своїй науковій роботі О. Петровський представив результати експериментальних досліджень функціонування біотехнічної системи для опромінення насіння пшениці височастотним електромагнітним полем. Опромінення здійснювалося із застосуванням безперервного синусоїдального сигналу різної вихідної потужності, що дозволило визначити вплив цього чинника на якість обробленого насіння [3].

Дослідження Кунденко М. П. та його колегами [2], демонструє значний потенціал для підвищення якості та схоронності зерна. Це дослідження не лише вказує на оптимальні параметри випромінювання, але й відкриває нові можливості для вдосконалення технологій обробки, зокрема, зниження рівня патогенів без шкоди для якості продукції.

Кунденко М. П. та інші автори [4] дослідили функціонування клітин на основі моделей, враховуючи вплив низькоенергетичного електромагнітного поля. Їхні дослідження підтверджують, що застосування таких технологій стимулює розвиток рослин, покращуючи їхню життєздатність і продуктивність. Новизна цих досліджень полягає в спрощенні схеми генератора, який створює імпульс струму, що проходить через фрактальне навантаження, формуючи падіння напруги. Це дозволяє ефективно генерувати електромагнітне поле з контролем параметрів, що в свою чергу покращує результати обробки.

Результати вищеописаних досліджень впливають на розвиток технологій знезараження зернових культур, відкриваючи нові перспективи для їх інтеграції у сільськогосподарські практики, що підвищує якість продукції і зменшує використання хімічних засобів.

Ця потреба в теорії і практиці найбільш очевидна по відношенню до мікрохвильових генераторів для знезараження зерна, де необхідно детально оцінити, як частота, потужність і час опромінення впливають на знищення патогенних мікроорганізмів при збереженні якості зерна. Ще одним важливим фактором, який слід вивчити, є те, як вплив електромагнітного випромінювання змінює фізико-хімічні характеристики зерна, в тому числі під час обробки вологість, склад поживних речовин і життєздатність насіння. Крім того, там, де бажано посилити метаболізм і біологічні процеси, буде корисно провести більше досліджень про те, як електромагнітні поля впливають на метаболізм рослинних клітин. З огляду на безпеку цих систем для працівників сільського господарства та навколишнього середовища, а також фінансові наслідки впровадження таких технологій у порівнянні з уже існуючими методами знищення бур'янів, буде проведена оцінка їхньої ефективності. Ці дослідження допоможуть покращити механізацію переробки, мінімізувати витрати на сировину, підвищити якість продукції та зменшити негативний вплив традиційних методів переробки на навколишнє середовище.

#### Формулювання мети дослідження

**Метою** дослідження є теоретичне обґрунтування доцільності розробки джерела електромагнітного випромінювання для знезараження зернових культур на елеваторах. Зокрема це буде зосереджено на:

1. Дослідження принципів дії електромагнітних хвиль на шкідників, що пошкоджують сільськогосподарські культури, з метою визначення їх оптимальних ефективних частот та потужностей, що забезпечить максимальний ефект знезараження.

2. Специфіка оцінки ефективності електромагнітного знезараження, тобто показники, що розглядаються для порівняння – потужність випромінювання, час обробки, рівень загибелі шкідників, збереження якості зерна. Також буде проведена оцінка економічних витрат на переробку та екологічних ефектів, що дозволить продемонструвати переваги використання електромагнітної технології порівняно з традиційними засобами.

3. Аналіз технічних характеристик та параметрів джерела випромінювання, його частоти та потужності, типу антени та системи управління.

#### Викладення основного матеріалу дослідження

На сьогоднішній день у світі спостерігається зростання кількості шкідників сільськогосподарських культур, що протидіє зростанню рівня агротехнічних підходів у сільському господарстві. Це вимагає впровадження інших методів контролю, наприклад, генераторів електромагнітних хвиль (ГЕХ) [5]. За допомогою цієї технології пестициди поки що не застосовуються, проте можна безпечно знезаражувати посіви та ефективно боротися зі шкідниками.

Значним викликом у процесі зберігання зернових культур є розвиток мікроскопічних грибів родів *Aspergillus* та *Fusarium*, які призводять до мікотоксикозів та значних економічних втрат. Обробка зерна мікрохвилями

з частотою 2,45 ГГц виявляє високу ефективність у знищенні цих патогенів. Механізм дії хвильового випромінювання полягає в нагріванні води всередині клітин мікроорганізмів, що призводить до їх загибелі. Дослідження показують, що 15-хвилинна обробка зерна електромагнітним випромінюванням (ЕМВ) знищує понад 90% мікроорганізмів, не впливаючи суттєво на якість зерна. Однак, вартість обладнання та енерговитрати є обмежувачами факторами для широкого застосування цієї технології в сільському господарстві (табл. 1) [6].

Механізм дії ЕМВ на мікроорганізми полягає в дипольно-релаксаційному нагріванні молекул води, що входять до складу клітин. Це призводить до денатурації білків, руйнування клітинних мембран та інших біологічних структур, що є життєво необхідними для функціонування мікроорганізмів. Зокрема, обробка зерна електромагнітним випромінюванням на частоті 2,45 ГГц протягом 15 хвилин забезпечує знищення понад 90% спор грибів родів *Aspergillus* та *Fusarium*. Цей метод має значну перевагу над традиційними хімічними методами дезінфекції, оскільки не передбачає використання токсичних речовин та забезпечує більш високий рівень безпеки харчових продуктів [4].

Згідно з дослідженнями Гавриленка О. С. та співавторів [16], антибіотикотерапія, тривалістю 30 хвилин, призвела до зниження кількості бактеріальних патогенів лише на 60%. Водночас, застосування електромагнітного випромінювання забезпечило більш ефективне пригнічення росту мікроорганізмів на рівні 70% порівняно з контрольною групою. Отримані результати свідчать про вищу ефективність електромагнітних технологій у дезінфекції зерна, що підтверджує їхню перспективність для забезпечення безпечного зберігання харчових продуктів [16].

Таблиця 1

## Результати експериментів на зразках зерна

Тип зараження	Зниження популяції (%)	Час обробки (хв)	Температура (°C)
<i>Aspergillus</i>	92	15	60
<i>Fusarium</i>	88	15	60
<i>Sitophilus granarius</i>	90	10	55
<i>Helicoverpa armigera</i>	85	10	55

Джерело: створено авторами на основі даних [6]

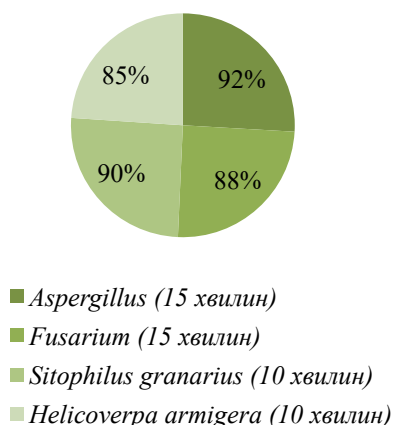


Рис. 1. Зниження популяції шкідливих організмів за типами зараження

Джерело: створено авторами на основі даних [6]

З рисунка 1 видно, що обробка електромагнітними хвилями виявилася найбільш ефективною у боротьбі з *Aspergillus* та *Sitophilus granarius*. Ці результати є обґрунтованими, оскільки зазначені шкідники характеризуються високим рівнем шкодочинності за умов високої щільності популяції. Це свідчить про те, що електромагнітне випромінювання може використовуватися як альтернатива хімічним засобам боротьби зі шкідниками, які нерідко мають нижчу ефективність і є досить токсичними для довкілля.

Крім того, результати, отримані в цьому дослідженні, продемонстрували, що придушення популяції шкідників можна досягти за допомогою електромагнітних хвиль навіть за умови значно меншої кількості обробок порівняно з тими, що потрібні для таких комах-шкідників, як *Helicoverpa armigera*. Це підтверджує доцільність застосування цього методу для захисту посівів зернових культур.

Дослідження показали, що електромагнітна дезінфекція (ЕМД) має значні переваги над традиційними методами, як свідчать результати проведених експериментів. Наприклад, застосування хімічних засобів, таких як фунгіциди, займає близько 30 хвилин і дозволяє зменшити чисельність цільової популяції лише на 40%. Окрім

меншої ефективності, хімічні методи сприяють розвитку стійкості у шкідників і створюють загрозу токсико-хімічного забруднення.

Метод інфрачервоного випромінювання [13] може забезпечити зниження чисельності шкідників на 60% за 20 хвилин, проте цей метод супроводжується високими витратами енергії та потребує дорогого обладнання. З іншого боку, електромагнітна дезінфекція є швидким і ефективним засобом боротьби з мікроорганізмами та шкідниками за порівняно короткий час і з мінімальними витратами ресурсів.

Застосування електромагнітних хвиль (ЕМХ) дозволяє значно скоротити витрати, пов'язані з протруюванням зернових культур. Ця технологія також мінімізує витрати, пов'язані з обробкою та знижує ризики, пов'язані з використанням хімічних речовин. Завдяки практичності електромагнітної знезаражувальної технології (ЕМЗ), фермери мають можливість суттєво підвищити якість та безпеку своєї продукції, що підтверджено даними, наведеними в таблиці 2.

Таблиця 2

### Порівняння ефективності різних методів обробки

Метод обробки	Зниження популяції (%)	Час обробки (хв.)	Витрати (грн.)
Контрольна	0	0	0
Хімічні обробки	40	30	100
Термальна обробка	60	20	80
ЕМХ	90	15	50

Джерело: створено авторами на основі даних [7]

На основі даних, представлених на графіку (рис. 2), чітко простежуються переваги застосування електромагнітної дезінфекції порівняно з традиційними методами. У випадку використання ЕМП ключовим фактором стає час, необхідний для зниження патогенного навантаження, що має вирішальне значення при зберіганні зернових культур. Менш ефективні результати хімічної та парової обробки свідчать про потребу в подальшому вдосконаленні цих технологій.

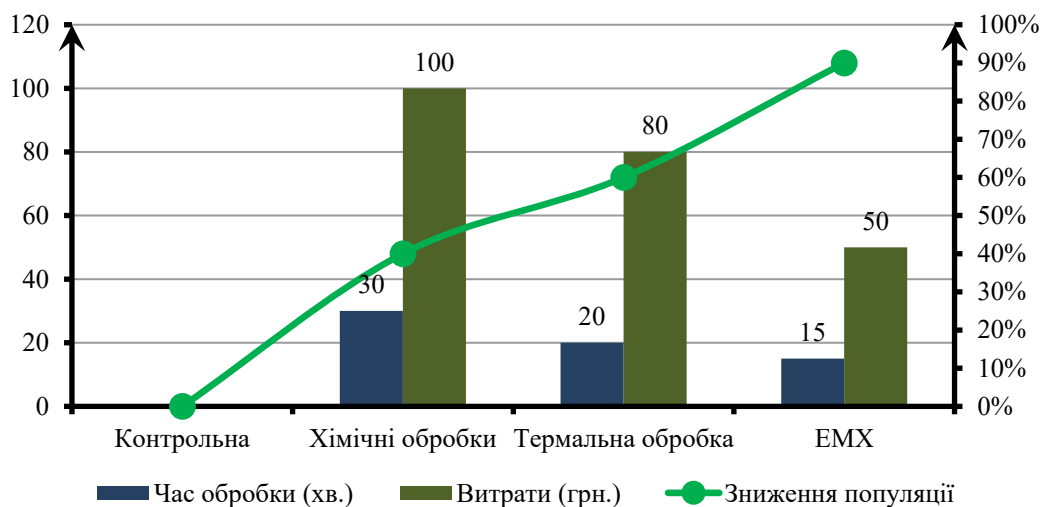


Рис. 2. Порівняння ефективності методів обробки

Джерело: створено авторами на основі даних [7]

З графіка (рис. 2) помітно, що, незважаючи на високі витрати на традиційні методи обробки, їхня ефективність суттєво поступає сучасним методам електромагнітної дезінфекції. Це підтверджує необхідність подальших інвестицій у розвиток систем електромагнітної обробки, що дозволить оптимізувати витрати на обробку продукції та підвищити якість зерна.

Ефективність мікрохвильових генераторів залежить від таких параметрів, як частота, потужність і тип антени. Частота 2,45 ГГц є найбільш придатною для промислових процесів, оскільки вона оптимально підходить для дипольно-релаксаційного нагрівання молекул, що містяться в клітинах мікроорганізмів. Потужність понад 1 кВт є достатньою для обробки великих обсягів продукції. При використанні рупорних антен електромагнітні хвилі рівномірно поширюються по всій оброблюваній площі, що сприяє максимальній ефективності процесу і досягненню найкращих результатів.

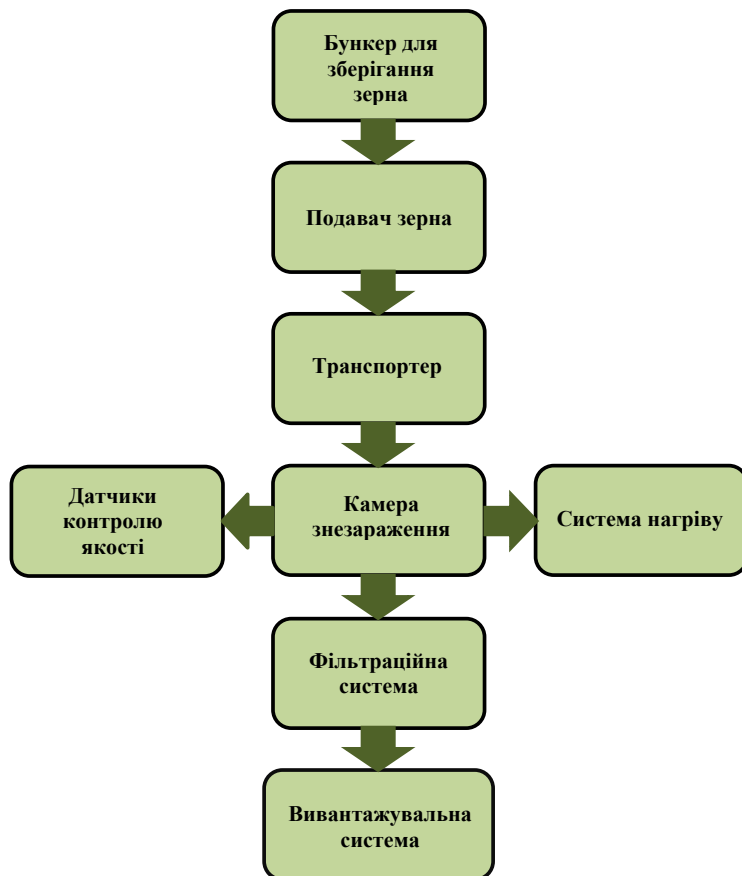


Рис. 3. Блок-схема основних елементів установки для знезараження

Джерело: власна розробка авторів

Блоки управління в сучасних генераторах електромагнітних хвиль (ГЕХ) відіграють ключову роль в оптимізації процесів знезараження. Датчики температури забезпечують точний контроль оброблюваної поверхні температури оброблюваного матеріалу, запобігаючи його перегріванню, що може негативно вплинути на якість зерна. Дослідження показали, що перевищення температури понад 60°C призводить до втрати 15–20% поживних речовин у зерні, що негативно впливає на його загальну якість.

Щодо рівня потужності випромінювання, інтегровані датчики забезпечують можливість регулювання потужності генератора в режимі реального часу. Це дозволяє підтримувати оптимальний рівень випромінювання, який коливається в межах від 600 до 1000 Вт, що є ефективним для знезараження. За потужності 800 Вт час обробки зерна скорочується до 10 хвилин, що дозволяє знищити до 90% патогенних мікроорганізмів при збереженні належної якості зерна.

Застосування точних датчиків у блоках управління не тільки оптимізує процеси знезараження, але й гарантує збереження високої якості зерна, мінімізуючи економічні втрати, пов'язані з погіршенням товарної вартості продукції.

Окремо варто звернути увагу на необхідність підготовки технічних матеріалів і документації, які містять схеми підключення та інструкції з експлуатації. Це полегшує налаштування обладнання та забезпечує безпеку його використання. Новітні конструктивні й технологічні рішення у генераторах здатні значно підвищити їхню продуктивність і ефективність (табл. 3).

Таблиця 3

Технічні характеристики генераторів НВЧ

Параметр	Значення	Одиниці	Коментар
Частота	2.45	ГГц	Оптимальна для обробки
Потужність	1.0	кВт	Максимальна потужність
Тип антени	Рупорна	-	Для рівномірного покриття
Системи контролю	Автоматизовані	-	Для забезпечення безпеки

Джерело: створено авторами на основі даних [8]

Згідно з даними, наведеними в таблиці 3, технічні параметри мікрохвильових генераторів, зокрема частота 2,45 ГГц, є найбільш оптимальними для ефективної переробки сільськогосподарських зернових культур [5]. Висока потужність до 1 кВт забезпечує продуктивну обробку великих обсягів продукції, що робить цю технологію придатною для комерційного використання.

Застосування спеціальних типів антен, таких як рупорні антени, сприяє рівномірному розподілу електромагнітних хвиль, що є важливим для уникнення появи «гарячих точок» під час обробки. Системи управління підвищують безпеку та надійність роботи генераторів, що є ключовим фактором для фермерів, які прагнуть зберегти високу якість своєї продукції.

Існують різні етапи, яких слід дотримуватися під час розробки генератора електромагнітних хвиль (ЕМХ). Перший етап полягає у визначенні матеріалів, що забезпечують найкращі характеристики випромінювання. Наприклад, магнетрони, які використовуються в генераторах, мають бути схвалені для застосування в сільському господарстві, щоб оцінити їх ефективність і безпеку. Крім того, важливо вибирати матеріали з високою теплопровідністю для підвищення надійності під час тривалої експлуатації [9; 10].

Процес створення генератора потребує особливої уваги до деталей. Зокрема, встановлення системи охолодження є критично важливим, оскільки вона запобігає перегріванню, що може знижувати експлуатаційну ефективність або, у гіршому випадку, призводити до поломки обладнання. У процесі розробки прототипу апарату необхідно здійснити вимірювання та документування стабільності його роботи за різних умов. Це дозволяє визначити експлуатаційні межі апарату і забезпечити його безпечне використання [11; 12].

Завершальний етап передбачає оцінку вихідної потужності. Досліджувані генератори мають вихідну потужність 1,2 кВт, що дозволяє їм ефективно обробляти значні обсяги зерна. Поступове підвищення вихідної потужності та поліпшення якості випромінювання свідчать про успішність розробки й відкривають перспективи для подальших удосконалень (табл. 4).

Таблиця 4

Результати випробувань прототипу генератора

Умови випробувань	Стабільність (%)	Вихідна потужність (кВт)	Якість випромінювання (%)
Висока вологість	95	1.1	90
Низька вологість	98	1.2	95
Температура 25°C	97	1.2	92
Температура 35°C	96	1.1	89

Джерело: створено авторами на основі даних [13; 14]

Завершальним етапом дослідження є оцінка вихідної потужності генератора. Як показано на графіку (рис. 4), генератор демонструє стабільність роботи за різних умов експлуатації, що є важливим для сільськогосподарських технологій. Показники стабільності на рівні 95–98% свідчать про здатність генератора ефективно працювати як у вологому, так і в сухому середовищі. Це є ключовим фактором для забезпечення надійності процесів зберігання та обробки зерна [13; 14].

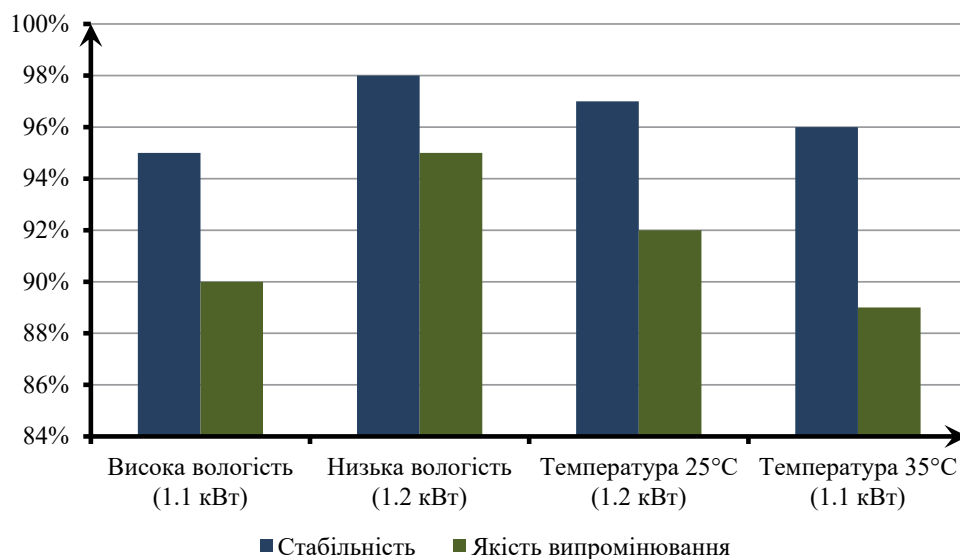


Рис. 4. Результати випробувань прототипу генератора

Джерело: створено авторами на основі даних [13; 14]

Номінальна потужність генератора становить 1,2 кВт, що вказує на його придатність для використання в промислових умовах. Водночас, якість випромінювання залишається в межах допустимих рівнів, що робить його безпечним для знезараження зернових культур [15].

Застосування електромагнітних полів (ЕМП) демонструє значно вищі результати порівняно з традиційними методами, зокрема хімічною обробкою, де ефективність у зниженні кількості патогенних мікроорганізмів зазвичай обмежується 60%. Наприклад, використання мікрохвиль під час обробки зерна забезпечує знищення до 90% шкідливих мікроорганізмів, таких як *Aspergillus* і *Fusarium*, які походять від рослинних шкідників. У той час як стандартні методи вимагають більше часу та значних зусиль для досягнення подібних результатів. Такі показники наочно демонструють ефективність використання генераторів електромагнітних полів (ЕМП) для підвищення якості та дотримання санітарних стандартів сільськогосподарської продукції. Це, в свою чергу, відкриває нові можливості для творчих та інноваційних підходів у цій сфері, особливо завдяки зниженню витрат на переробку продукції та покращенню її екологічної безпеки.

### Висновки

Аналітичні та експериментальні дослідження з використанням пристроїв, що випромінюють електромагнітні хвилі (ЕМХ) для дезінфекції зернових культур, підтвердили їх високу ефективність у боротьбі з різними шкідливими організмами, такими як грибки, бактерії та паразити. Застосування механізмів дії ЕМХ, зокрема нагрівання, резонанс і руйнування клітинних мембран, дозволило знищити до 90% шкідників за 15 хвилин обробки, що суттєво перевищує результати, отримані традиційними методами. Дослідження також показало, що застосування мікрохвиль у боротьбі зі шкідниками, порівняно з класичними методами, забезпечує кращу економічну ефективність при зменшенні втрат діючих речовин. Таким чином, фермери, які прагнуть підвищити якість свого врожаю, можуть скористатися перевагами цієї технології, не завдаючи шкоди навколишньому середовищу. Тенденції в оптимізації частоти та потужності, а також удосконалені системи управління підтверджують ефективність мікрохвильових генераторів у промислових процесах. Висока стабільність роботи цього генератора за різних умов значно спрощує його застосування в сільськогосподарській діяльності.

Впровадження мікрохвильової технології в сільське господарство сприяє значному скороченню використання хімічних пестицидів, що позитивно впливає на екологічну безпеку. Крім того, застосування технології ЕМХ підвищує врожайність на 15–20%, знижує витрати на переробку, покращує якість зернової продукції та створює перспективи для розвитку сталого агробізнесу.

### Список використаної літератури

1. Кунденко М. П., Мардзявко В. А., & Руденко А. Ю. 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. DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-5364.2023.3.03>
2. Кунденко М. П., Мардзявко В. А., Руденко А. Ю. Вирішення питання якості обробки зерна за рахунок електромагнітного впливу. *Інноваційно-інвестиційний розвиток аграрної сфери – запорука продовольчої безпеки країни* : матеріали міжнародної науково-практичної конференції, 26 травня 2022 р., м. Миколаїв / Міністерство освіти і науки України ; Миколаївський національний аграрний університет. Миколаїв : МНАУ, 2022. С. 12–14.
3. Фізико-математична модель електричних властивостей біологічних тканин насіння пшениці та їх зміна під впливом електромагнітного випромінювання високочастотного діапазону / О.М. Петровський та ін. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*. 2019. Т. 2, № 54. С. 139–143. DOI: <https://doi.org/10.26906/sunz.2019.2.139>
4. Development of a Model of Cell Functioning to Measure the Interaction of Low-Energy EMF / M. Kundenko et al. *2022 XXXII International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance (MMA)*, Sozopol, Bulgaria, 7–11 September 2022. 2022. URL: <https://doi.org/10.1109/mma55579.2022.9993093> (date of access: 04.10.2024).
5. Сидорук Ю. К. Електромагнітні технології обробки зерна. *COMING SOON*. URL: [https://kivra.kpi.ua/wp-content/uploads/file/kivra\\_science\\_turovskyi.pdf](https://kivra.kpi.ua/wp-content/uploads/file/kivra_science_turovskyi.pdf) (дата звернення: 04.10.2024).
6. Турянчик В. Чинники, що впливають на якість і безпечність зерна. *УЗА*. URL: <https://uga.ua/meanings/chinniki-shho-vplyvayut-na-yakist-i-bezpechnist-zerna/> (дата звернення: 04.10.2024).
7. Effect of an ultra-high frequency electromagnetic field on the physical properties of spelt grain / N. Osokina et al. *Scientific horizons*. 2024. Vol. 27, no. 3. P. 64–72. URL: <https://doi.org/10.48077/scihor3.2024.64.1>. (date of access: 04.10.2024).
8. Потапов В. О., Жила В. І. Теоретичні та практичні аспекти застосування мікрохвильового й інфрачервоного випромінювання в харчових технологіях: монографія. Харків: ДБТУ, 2024. 136 с.
9. Ruiz-Canales A., García M. F.-V. Sustainable applications in agriculture. *Sustainability*. 2021. Vol. 13, no. 8. P. 4136. URL: <https://doi.org/10.3390/su13084136> (date of access: 04.10.2024).



10. Application of microwave energy in agriculture / M. Tuhvatullin et al. *Mathematical modelling of engineering problems*. 2023. Vol. 10, no. 2. P. 412–418. URL: <https://doi.org/10.18280/mmep.100204> (date of access: 04.10.2024).
11. Thermal and electromagnetic stator vent design optimisation for synchronous generators / K. Bersch et al. *IEEE transactions on energy conversion*. 2020. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/tec.2020.3004393> (date of access: 04.10.2024).
12. Thermal management of thermoelectric generators for waste energy recovery / P. Fernández-Yáñez et al. *Applied thermal engineering*. 2021. Vol. 196. P. 117291. URL: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117291> (date of access: 04.10.2024).
13. Microwave generators, transmission, and interaction with different materials. *Microwave chemistry*. 2017. P. 31–52. URL: <https://doi.org/10.1515/9783110479935-003> (date of access: 04.10.2024).
14. Стійкість робочих режимів автономних асинхронних генераторів із самозбудженням / Н. Красношапка та ін. *Технічна електродинаміка*. 2024. №(3). С. 47–53. URL: <https://doi.org/10.15407/techned2024.03.047> (дата звернення: 04.10.2024).
15. Abdelaal A. A. A., B. M. E.-D. Effect of Nonionizing Electromagnetic Waves on Some Stored Grain Pests. *Journal of Entomology*. 2014. Vol. 11, no. 2. P. 102–108. URL: <https://doi.org/10.3923/je.2014.102.108> (date of access: 04.10.2024).
16. Гавриленко О. С., Хоміцька О. А., Загорулько О. В. Оцінка впливу мікробіологічних процесів під час зберігання зерна ярої пшениці. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2016. № 4. С. 31–35. URL: <https://doi.org/10.31210/visnyk2016.04.05> (дата звернення: 04.10.2024).

### References

1. Kundenko M. P., Mardziavko V. A., & Rudenko A. Yu. (2023) Analiz tekhnolohii heneratsii NVCh vyprominennia z vyznachenням adaptivnoho typu diodiv dlia podalshoho konstruktivuvannia aparativ dlia znezarazhennia. [Analysis of the technology of microwave radiation generation with the determination of the adaptive type of diodes for further construction of disinfection devices]. *Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia*, no. 3, pp. 24–37. <https://doi.org/10.20998/2078-5364.2023.3.03>
2. Kundenko M. P., Mardziavko V. A., & Rudenko A. Yu. (2022) Vyrishennia pytannia yakosti obrobky zerna za rakhunok elektromahnitnoho vplyvu. [Solving the issue of grain processing quality through electromagnetic influence]. *Innovatsiino-investytsiyni rozvytok ahrarnoi sfery – zaporuka prodovolchoi bezpeky krainy: Materialy mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii*, Mykolaiv, 2022, pp. 12–14.
3. Petrovskii O. M., et al. (2019) Fyzyko-matematychna model elektropryvydykh vlastyvopei biologichnykh tkanyn nasinnia pshenytsi ta yikh zmina pid vplyvom elektromahnitnoho vyprominiuvannia vysokochastotnoho diapazonu. [Physico-mathematical model of the electrical properties of wheat seed tissues and their change under the influence of high-frequency electromagnetic radiation]. *Systemy upravlinnia, navihaetsii ta zviazku*, vol. 2, no. 54, pp. 139–143. <https://doi.org/10.26906/sunz.2019.2.139>
4. Kundenko M., et al. (2022) Development of a Model of Cell Functioning to Measure the Interaction of Low-Energy EMF. *2022 XXXII International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance (MMA)*, Sozopol, Bulgaria, 7–11 September 2022. <https://doi.org/10.1109/mma55579.2022.9993093> (date of access: 04.10.2024).
5. Sydoruk Yu. K. (2024) Elektromahnitni tekhnolohii obrobky zerna. *COMING SOON*. [https://kivra.kpi.ua/wp-content/uploads/file/kivra\\_science\\_turovskiyi.pdf](https://kivra.kpi.ua/wp-content/uploads/file/kivra_science_turovskiyi.pdf) (date of access: 04.10.2024).
6. Turianchuk V. (2024) Chynnyky, shcho vplyvaiut na yakist i bezpechnist zerna. *UZA*. <https://uga.ua/meanings/chinniki-shho-vplyvaiut-na-yakist-i-bezpechnist-zerna/> (date of access: 04.10.2024).
7. Osokina N., et al. (2024) Effect of an ultra-high frequency electromagnetic field on the physical properties of spelt grain. *Scientific horizons*, vol. 27, no. 3, pp. 64–72. <https://doi.org/10.48077/scihor3.2024.64> (date of access: 04.10.2024).
8. Potapov V. O., Zhila V. I. (2024) Teoretychni ta praktychni aspekty zastosuvannia mikrokhylovoho i infrakrasnoho vyprominiuvannia v kharchovykh tekhnolohiiakh: monografii. [Theoretical and practical aspects of the application of microwave and infrared radiation in food technologies: monograph]. Kharkiv: DBTU, 136 p. [in Ukrainian].
9. Ruiz-Canales A., & García M. F.-V. (2021) Sustainable applications in agriculture. *Sustainability*, vol. 13, no. 8, p. 4136. <https://doi.org/10.3390/su13084136> (date of access: 04.10.2024).
10. Tuhvatullin M., et al. (2023) Application of microwave energy in agriculture. *Mathematical modelling of engineering problems*, vol. 10, no. 2, pp. 412–418. <https://doi.org/10.18280/mmep.100204> (date of access: 04.10.2024).
11. Bersch K., et al. (2020) Thermal and electromagnetic stator vent design optimisation for synchronous generators. *IEEE transactions on energy conversion*, pp. 1. <https://doi.org/10.1109/tec.2020.3004393> (date of access: 04.10.2024).
12. Fernández-Yáñez P., et al. (2021) Thermal management of thermoelectric generators for waste energy recovery. *Applied thermal engineering*, vol. 196, p. 117291. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117291> (date of access: 04.10.2024).
13. Microwave generators, transmission, and interaction with different materials. (2017) *Microwave chemistry*, pp. 31–52. <https://doi.org/10.1515/9783110479935-003> (date of access: 04.10.2024).

14. Krasnoshapka N., et al. (2024) Stiikist robochykh rezhymiv avtomomnykh asynkhronnykh heneratoriv iz samozbudzhenniam. *Tekhnichna elektrodynamika*, no. 3, pp. 47–53. <https://doi.org/10.15407/techned2024.03.047> (date of access: 04.10.2024).
15. Abdelaal A. A. A., & B. M. E.-D. (2014) Effect of Nonionizing Electromagnetic Waves on Some Stored Grain Pests. *Journal of Entomology*, vol. 11, no. 2, pp. 102–108. <https://doi.org/10.3923/je.2014.102.108> (date of access: 04.10.2024).
16. Havrylenko O. S., Khomitska O. A., & Zahorulko O. V. (2016) Otsinka vplyvu mikrobiolohichnykh protsesiv pid chas zberihannia zerna yarooho pshenytsi. [Assessment of the impact of microbiological processes during storage of spring wheat grain]. *Visnyk Poltavskoi derzhavnoi ahrarnoi akademii*, no. 4, pp. 31–35. <https://doi.org/10.31210/visnyk2016.04.05> (date of access: 04.10.2024).