

**МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ П'ЄЗОКЕРАМІЧНОГО
УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДАТЧИКА В СЕРЕДОВИЩІ МАТЛАВ ПРИ
ПРОЗВУЧУВАННІ ҐРУНТУ ЗА НАЯВНОСТІ ПЛУЖНОЇ ПІДОШВИ**

Антипчук Богдан Олександрович

викладач спеціальних дисциплін першої категорії,
здобувач вищої освіти ступеня доктора філософії
Житомирський агротехнічний фаховий коледж
м. Житомир, Україна

У статті наведено дані проведеного дослідження по моделюванню п'єзокерамічного датчика, який є яке основним елементом системи оперативного керування глибиною ходу ґрунторозпушувача машинно-тракторного агрегата на основі радіохвильового профілювання поверхні поля

(з використанням радіофізичних методів). Дослідження проводилось в середовищі Matlab.

Ключові слова: Matlab, підпрограма Propagation, п'єзокерамічний ультразвуковий датчик, ґрунт, ультразвук, звукова хвиля, акустичний опір, коливальна швидкість, звуковий тиск, інтенсивність звуку, щільність ґрунту, плужна підшва.

Вступ. Першочергова проблема ефективної організації виробництва – це підвищення технологічного рівня виробництва сільськогосподарської продукції, а також використання економічних методів господарювання. Розв'язання цієї проблеми можливе шляхом удосконалення наявних технологій обробітку ґрунту та утворення принципово нових конструкцій машин з обробітку ґрунту (які будуть оснащені радіофізичними приладами для моніторингу щільності чи будь-яких інших агрегатних станів ґрунту).

При розгляданні самого процесу обробітку ґрунту, як ґрунтоутворюючого чинника з одного боку, та найзатратнішого з іншої точки зору, виникає потреба

створення нових знарядь та техніки, яка діє на ґрунт з мінімально негативною дією та при цьому якомога менше витрачаються енергетичні ресурси сільськогосподарського комплексу.

Основною метою проведенного дослідження є технічне забезпечення ефективного розуцільнення ґрунту в сучасних технологіях рослинництва з найменшими енергетичними затратами та підвищення врожайності сільськогосподарських культур. При цьому необхідно було визначити оптимальну частоту роботи п'єзокерамічного датчика, який працює на ультразвукових частотах, і який визначає відстань до переуцільненого шару ґрунту. Саме це питання і розглядається в даній статті.

В середовищі Matlab, в підпрограмі Propagation, проводилось моделювання роботи п'єзокерамічного ультразвукового датчика згідно основних положень акустики, за рівняннями (1.1), (1.2):

$$\begin{aligned} v_1 + v_1' &= v_2 \\ P_1 + P_1' &= P_2 \end{aligned} \Big|_{x=0} [5, \text{с. 143}], \quad (1.1)$$

де v_1, v_1', v_2 (м/с) – коливальня швидкість хвилі, що падає, відбивається та проходить у ґрунт; звукові тиски хвиль, яка падає, проходить і відбивається відповідно P_1, P_2 і P_1' (Па).

$$\begin{aligned} P_1 + P_1' &= P_2 \\ \frac{P_1 - P_1'}{Z_1} &= \frac{P_2}{Z_2} \end{aligned} \Big|_{x=0} [5, \text{с. 143}] \quad (1.2)$$

де Z_1 та Z_2 (Па·с/м³) – питомі хвильові опори верхнього пласта ґрунту та плужної підшви.

Також до уваги було взято рівність напруг виду:

$$\begin{cases} Z_1 < Z_2 \\ \rho_1 < \rho_2 \\ \rho_2 = \rho_{max} \\ W_I = 0 \\ V_I \approx 1 \\ V_P = -V_v \end{cases} = \begin{cases} v_1 = -v_1' \\ P_1 = -P_1' \\ P_1 = -P_1' \\ \frac{P_1 - P_1'}{Z_1} = 0 \end{cases} \Big|_{x=0}, \quad (1.3)$$

отриманої в процесі проведенного дослідження, де V_I, W_I (%) – коефіцієнти відбиття та проходження звукової енергії за інтенсивністю; V_P (%)

– коефіцієнт відбиття за звуковим тиском; ρ_1 та ρ_2 (кг/м^3) – щільність верхнього пласта ґрунту та плужної підшови. Також застосовувалась система рівнянь, дійсна при моделюванні акустичної поведінки плужної підшови, де I (Вт/м^2) – інтенсивність звукової хвилі; A_v (%) – амплітудний коефіцієнт відбиття; V_v (%) – коефіцієнт відбиття за коливальною швидкістю:

$$\begin{cases} W_I = 0 \\ V_I \approx 1 \\ I = A_v^2 \\ V_P = -V_v \end{cases} = \begin{cases} \frac{P_1'}{P_1} = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 \\ \frac{v_1'}{v_1} = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2 \end{cases}, \quad (1.4)$$

Підпрограма Propagation дозволяє провести аналіз зміни вихідного сигналу при проходженні хвилі через різні типи ґрунту та перевірити її відбиття від ущільненого шару, а також здійснити побудову вхідного (прийнятого сигналу) сигналу. Вікно створеної підпрограми зображено на рисунку 1.

В підпрограмі передбачено введення вихідних даних таких як: параметри середовища та параметри ультразвукової хвилі. Як відомо, принцип визначення ущільненого шару ґрунту в цій підпрограмі полягає в методі ультразвукового вимірювання відстані: п'єзокерамічний ультразвуковий датчик випромінює ультразвуковий імпульс, знаючи швидкість c (м/с) розповсюдження звуку в типі ґрунту та вимірюючи час t (с) між випромінюванням та прийняттям звукової хвилі; схемотехніка датчика виконує розрахунок глибини залягання ущільненого шару ґрунту H (см).

$$H = \frac{c \cdot t}{2}. \quad [3, \text{с. 78}] \quad (1.5)$$

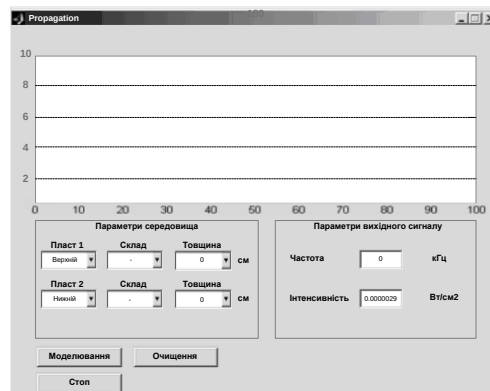


Рис. 1. Вікно підпрограми Propagation

Оскільки одним із завдань моделювання є перевірка відбиття

випромінюваної хвилі від ущільненого шару ґрунту, то параметр глибини його залягання вноситься у вихідні дані параметрів середовища підпрограми Propagation, а побудову вхідного сигналу програма виконуватиме розраховуючи час між випромінюванням та прийняттям звукової хвилі t (с):

$$t = \frac{2 \cdot H}{c}. [3, \text{с. 78}] \quad (1.6)$$

Ще один важливий параметр, який розраховує підпрограма для побудови вхідного сигналу – це коефіцієнт згасання δ (Нпсм або Дб/м), який впливає на амплітуду вхідного сигналу порівняно з вихідним. Для твердих матеріалів (для ґрунту також) він дорівнює сумі коефіцієнтів поглинання $\delta_{\text{п}}$ (Нп/Гц·м) та розсіювання $\delta_{\text{р}}$ (см⁻¹ або м⁻¹):

$$\delta = \delta_{\text{п}} + \delta_{\text{р}}. [3, \text{с. 26}] \quad (1.7)$$

Для аморфних середовищ, до яких відноситься і ґрунт, $\delta_{\text{р}}$ рівний 0, а $\delta_{\text{п}}$ пропорційний частоті, тобто $\frac{\delta_{\text{п}}}{f}$ [3, с. 26], тоді для ґрунту:

$$\delta = xf + 0 = xf, \quad (1.8)$$

де f (Гц) – робоча частота, x (см) – відстань, на якій зменшується амплітуда коливань. У вкладці параметрів середовища підпрограми Propagation можна задавати пласт, склад та товщину ґрунту, через який проходитиме ультразвукова хвиля. Ці ґрунти описані у підпрограмі наступними незмінними параметрами, які наведені у таблиці 1.

Таблиця 1

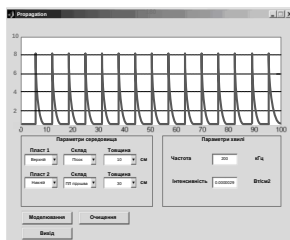
Основні параметри різних типів ґрунтів

Тип середовища	Мінімальна швидкість розповсюдження звуку c , м/с	Середнє значення щільності ρ , кг/м ³	Акустичний опір Z , 10 ³ ·Па·с/м
Чорнозем	200	1250	250
Пісок	300	600	180
Глина	1800	1500	2700
Плужна підшва	3200	2700	8640

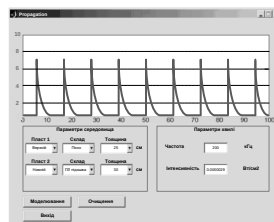
Моделювання в підпрограмі Propagation проводилось на трьох різних частотах вхідного сигналу (а саме: 200 кГц, 600 кГц та 1000 кГц) з метою

аналізу впливу частоти вихідного сигналу на можливість його проходження через різні типи ґрунту та його відбиття від плужної підшви, яка була розміщена на трьох різних глибинах: 10 мм, 25 мм, 50 мм, а також визначення оптимальної робочої частоти п'єзокерамічного ультразвукового датчика, який в подальшому буде використаний в розробленій системі оперативного керування глибиною ходу ґрунторозпушувача сільськогосподарського машиннотракторного агрегату.

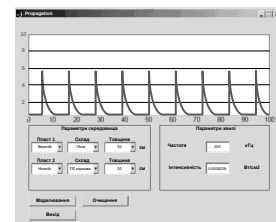
Моделювання проходження ультразвукової хвилі частотою 200 кГц:



$H = 10 \text{ см}$

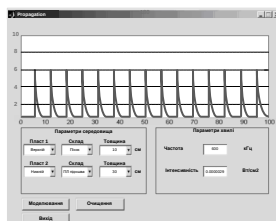


$H = 25 \text{ см}$

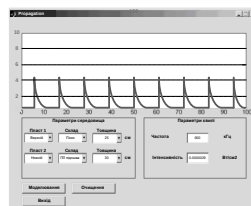


$H = 50 \text{ см}$

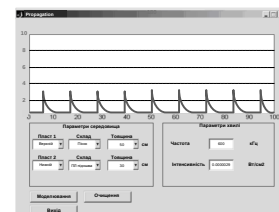
Моделювання проходження ультразвукової хвилі частотою 600 кГц:



$H = 10 \text{ см}$

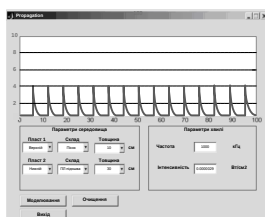


$H = 25 \text{ см}$

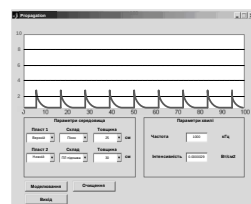


$H = 50 \text{ см}$

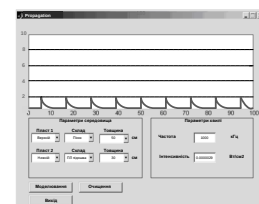
Моделювання проходження ультразвукової хвилі частотою 1000 кГц:



$H = 10 \text{ см}$



$H = 25 \text{ см}$



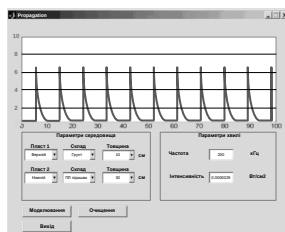
$H = 50 \text{ см}$

Рис. 2. Моделювання проходження ультразвукової хвилі через пісок при різних частоті вихідного сигналу та глибині залягання плужної підшви.

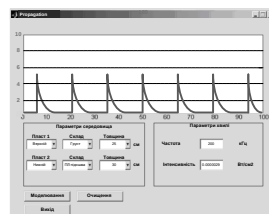
До того ж, моделювання в підпрограмі дозволило перевірити вплив типу ґрунту і його товщини на якість отриманого сигналу.

На рисунку 2 зображено результати, отримані при моделюванні проходження ультразвукової хвилі через пісок. Аналізуючи отримані дані у вигляді вхідного (прийнятого) сигналу, можна зробити висновок, що на кожній із частот вихідного сигналу, при яких проводилось моделювання проходження ультразвукової хвилі через пісок, якість отриманого сигналу ставала гіршою при збільшенні глибини залягання плужної підшви. Це можна пояснити тим, що хвилі при збільшенні глибини залягання плужної підшви потрібно проходити через більший шар піску, внаслідок чого відбувалось її згасання і амплітуда отриманого сигналу таким чином стає меншою.

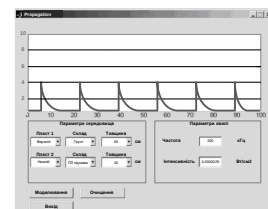
Моделювання проходження ультразвукової хвилі частотою 200 кГц:



$H = 10 \text{ см}$

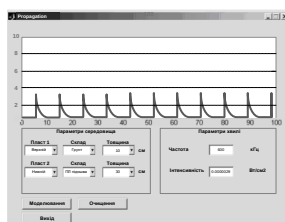


$H = 25 \text{ см}$

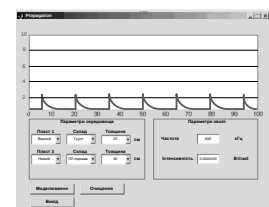


$H = 50 \text{ см}$

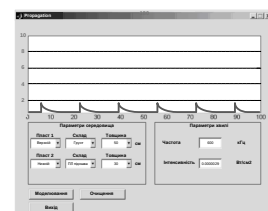
Моделювання проходження ультразвукової хвилі частотою 600 кГц:



$H = 10 \text{ см}$

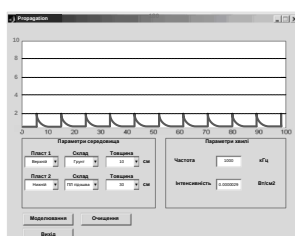


$H = 25 \text{ см}$

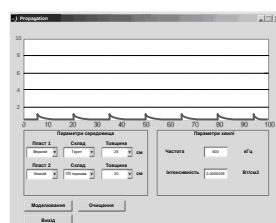


$H = 50 \text{ см}$

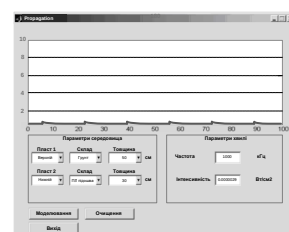
Моделювання проходження ультразвукової хвилі частотою 1000 кГц:



$H = 10 \text{ см}$



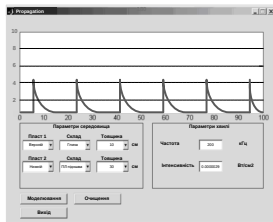
$H = 25 \text{ см}$



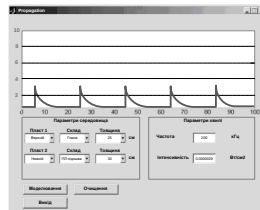
$H = 50 \text{ см}$

Рис. 3. Моделювання проходження ультразвукової хвилі через чорнозем при різних частоті вихідного сигналу та глибині залягання плужної

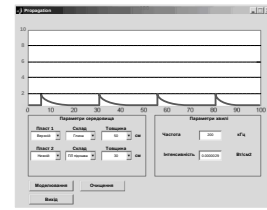
Моделювання проходження ультразвукової хвилі частотою 200 кГц:



$H = 10 \text{ см}$

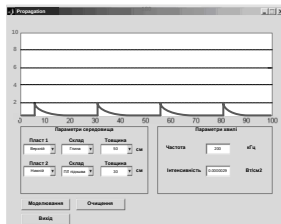


$H = 25 \text{ см}$

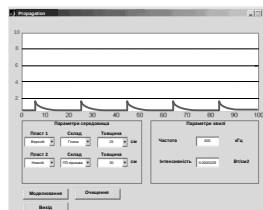


$H = 50 \text{ см}$

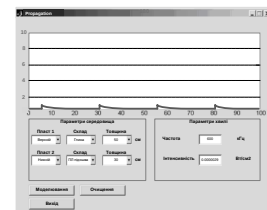
Моделювання проходження ультразвукової хвилі частотою 600 кГц:



$H = 10 \text{ см}$

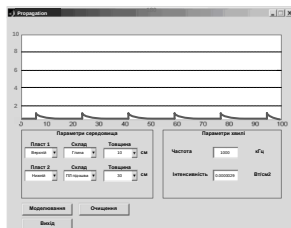


$H = 25 \text{ см}$

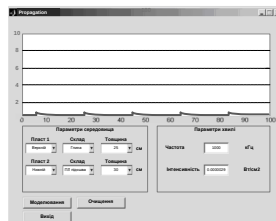


$H = 50 \text{ см}$

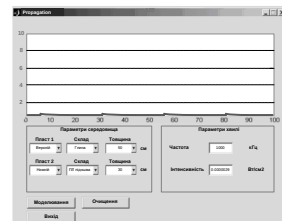
Моделювання проходження ультразвукової хвилі частотою 1000 кГц:



$H = 10 \text{ см}$



$H = 25 \text{ см}$



$H = 50 \text{ см}$

Рис. 4. Моделювання проходження ультразвукової хвилі через глину при різних частоті вихідного сигналу та різних глибині залягання плужної підшви

Однак, сам пісок не так сильно впливає на амплітуду вхідного сигналу як зміна частоти вихідного сигналу у бік збільшення. При збільшенні частоти вихідного сигналу до 600 кГц амплітуда отриманого сигналу зменшилась в середньому на 2В порівняно з амплітудою вхідного сигналу, отриманою на частоті 200 кГц. На частоті 1 МГц ця різниця склала вже 4 В. Тенденція суттєвого зменшення амплітуди вхідного сигналу при збільшенні частоти вихідного спостерігалася і при моделюванні проходження ультразвукової хвилі через чорнозем та глину, тобто, в свою чергу – це ще раз доводить той факт, що

при збільшенні частоти довжина хвилі стає меншою і, відповідно, зменшується глибина її розповсюдження у середовищі, хоча, як правило, при цьому має зростати її роздільна здатність.

Проте, аналізуючи отримані дані моделювання, показані на рисунку 2, бачимо, що для визначення плужної підшви ультразвуковою хвилею, яка проходить через пласт піску цілком достатньою є частота 200 кГц.

На рисунку 3 зображено результати, отримані при моделюванні проходження ультразвукової хвилі через чорнозем, аналізуючи отримані результати, можна зробити висновок, що амплітуда вхідного сигналу на частоті 200 кГц трохи зменшилась порівняно із результатами моделювання, отриманими при проходженні ультразвукової хвилі через пісок, а на частотах 600 кГц та 1 МГц рівень амплітуди вхідного сигналу став таким, що визначити плужну підову було проблематично або неможливо, що знову ж таки спонукає до використання у створенні системи автоматичного керування глибиною ходу ґрунторозпушувача сільськогосподарського машиннотракторного агрегата радіофізичними методами низькочастотного ультразвукового датчика з частотою близькою або рівною 200 кГц.

На рисунку 4 показано результати, отримані при моделюванні проходження ультразвукової хвилі через глину. Як можна помітити, що тенденція зменшення амплітуди вхідного сигналу при збільшенні частоти спостерігається аналогічно попередніми двома варіантами моделювання, коли в якості досліджуваного середовища брався пісок та чорнозем. На частоті 200 кГц рівень амплітуди сигналу був менший, ніж у попередніх двох випадках, але все-таки залишався задовільним для визначення плужної підшви. На частотах 600 кГц та 1 МГц ультразвукова хвиля плужну підшву визначити не змогла, отриманий вхідний сигнал мав дуже малий рівень амплітуди.

Отже, узагальнюючи дані, отримані під час моделювання проходження ультразвукової хвилі через різні типи ґрунту та визначення при цьому плужної підшви, можна зробити висновок про те, що якість прийнятого сигналу, який несе інформацію про наявність плужної підшви, сильно залежить від вихідної

частоти ультразвукового датчика і, як показують досліди, вона повинна бути в межах близьких до 200 кГц. Саме при такій частоті в переважній кількості проведених дослідів спостерігався достатній рівень вхідного сигналу, який давав змогу чітко визначити наявність плужної підшви. Другим основним фактором впливу на якість прийнятого сигналу була глибина залягання плужної підшви та склад ґрунту. В проведених дослідях при максимальній глибині залягання плужної підшви 50 см найгіршою була якість сигналу при проходженні через глину, однак, на практиці (у польових умовах) ґрунти містять лише якийсь її певний відсоток і тому здійснювати якісну оцінку визначення плужної підшви доцільніше у польових умовах, використовуючи при цьому безпосередньо сам прототип системи визначення ущільненого шару ґрунту сільськогосподарського МТА радіофізичними методами.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Антипчук Б. О. Ультразвуковий експериментальний пристрій – основний елемент автоматизованої системи керування положенням ґрунторозпушувача. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин* : загальнодерж. міжвідомч. наук.-техн. зб. Кропивницький : ЦНТУ, 2017. Вип. 47, Ч. 1. С. 47-51 : іл.
2. Антипчук Б. О. Ультразвуковий моніторинг щільності ґрунту. *Природно-ресурсний та енергетичний потенціал: напрями збереження, відновлення та раціонального використання* : кол. монографія / за ред.: О. О. Горба, Т. О. Чайки, І. О. Яснолюб. Полтава : ПДАА, 2019. С. 129-134 : іл.
3. Ермолов И. Н., Ермолов М. И. Ультразвуковой контроль : учебник. Изд. 5-е, стер. Москва : Азимут, 2006. 208 с.
4. Мобільний вимірювальний комплекс для безконтактного визначення щільності ґрунту: пат. КМ 137526 Україна: МПК (2019.01), G01N 9/00, G01N 9/24 (2006/01) / Б. О. Антипчук, В. Г. Мироненко; заявл. 15.04.2019; опубл. 25.10.19. Бюл. № 20 (кн. 1). С. 4.71.
5. Шутилов В. А. Основы физики ультразвука. Ленинград, 1980. 280 с.