

ДОСЛІДЖЕННЯ ЩІЛЬНОСТІ ҐРУНТУ НЕРУЙНІВНИМ МЕТОДОМ

Кравчук Володимир Іванович

доктор технічних наук, професор,
 Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків
 Національної академії аграрних наук України, м. Київ, Україна
 ORCID: 0000-0003-2196-4960
 kravchukvi@ukr.net

Іванюта Михайло Васильович

кандидат технічних наук
 Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків
 Національної академії аграрних наук України, м. Київ, Україна
 ORCID: 0000-0002-2180-1929
 ur6hdc@ukr.net

Зайцев Євген Олександрович

доктор технічних наук, старший науковий співробітник
 Інститут електродинаміки Національної академії наук України, м. Київ, Україна
 ORCID: 0000-0003-3303-471X,
 ZaitsevIO@nas.gov.ua

Арендаренко Володимир Миколайович

кандидат технічних наук
 Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна
 ORCID: 0000-0003-0701-7983
 arendarenkovm@pdau.edu.ua

В статті наведено результати теоретичних та експериментальних досліджень з визначення зв'язків щільності та вологості ґрунту індукційним методом. Встановлено, що зазначені характеристики можуть бути описані моделями другого порядку та використані для розробки засобів безконтактного потокового визначення щільності та структури ґрунту. Визначення магнітної сприйнятливості є перспективним методом в дослідженнях класів речовин, що дозволяє визначати внутрішню структуру речовин, а також характер їх взаємодій. У цьому разі ґрунт може бути розглянуто як магнітний матеріал, що вступає у взаємодію з магнітним полем, характеристики якого можна визначити питомими енергетичними змінними джерела намагнічування. За своїм хімічним складом ґрунт можна класифікувати як композитний матеріал на основі діамагнетиків та парамагнетиків. Проаналізовано залежності магнітної проникності в діапазоні змін магнітного поля 0,85–1,85 МГц для щільності 1,0–1,4 г/см³ і вологості 0–30%. Результати досліджень є перспективними для розвитку технологій і засобів дистанційного визначення агрофізичних показників ґрунту. Результати досліджень можуть бути адаптовані до визначення агрохімічного складу що можуть бути пов'язані з магнетохімічними показниками ґрунту. Мета досліджень: Моделювання способу дистанційного (безконтактного) визначення агрофізичних параметрів ґрунту індукційним методом, встановлення зв'язків агрофізичних параметрів ґрунту в змінному індукційному полі з магнітною проникністю ґрунту та вплив на процес визначення вмісту вологи. Методи дослідження. Аналітичні дослідження принципів взаємодії магнітного поля з діа- та парамагнетиками. Експериментальні дослідження взаємодії зразків ґрунту з змінним індукційним полем. Аналіз нелінійних моделей взаємозв'язків ґрунту з магнітним полем. Порівняння теоретичних і експериментально отриманих характеристик в межах діапазонів взаємодій ґрунту з індукційним полем. Результати дослідження. Систематизовано розрізнені засоби та методи потокового визначення магнітної проникності на основі кривої намагнічування. Обґрунтовано перспективні методи потокового визначення щільності ґрунту на основі характеристик магнітної сприйнятливості та в'язкості.

Ключові слова: щільність ґрунту, індукційний неруйнівний метод, магнетохімія, магнітна проникність, магнітний гістерезис, магнітна в'язкість, Ларморова прецесія.

DOI <https://doi.org/10.32782/msnau.2023.3.9>

Вступ. Вирішення проблем потокового визначення агрофізичних властивостей ґрунту для сучасних систем землеробства є актуальним питанням для розробки автоматизованих систем поточного керування фазовим станом ґрунту (Ivaniuta et al., 2023).

Відомо також, що з позиції агрофізичних параметрів ґрунт можна характеризувати як композит, що складається з твердої (мінеральної та органічної), рідкої, газоподібної і живої частин. До складу твердої фази ґрунту входять різні хімічні елементи з різним вмістом та

співвідношенням. Тверда частина ґрунту містить основні запаси поживних елементів що можна поділити на мінеральні (90–99 % маси) і органічні частини (1–10 %) (Hudz' at all., 2010; Kravchuk at all, 2023).

Також відомо що мінеральна частина ґрунту на 90% складається з трьох елементів: оксиду кремнію, оксиду алюмінію і кисню (Volodin, 2002; Kravchuk at all, 2023). Магнітохімічні дослідження агрофізичних властивостей можуть бути проведені на основі досліджень основних компонентів або питомого значення щільності (Alekseev 2011).

Відомо, що процес взаємодії магнітного поля з ґрунтом характеризується як діамагнетизм та парамагнетизм що може бути покладене в основу магнітохімічних досліджень властивостей ґрунту (Kellerman, 2008; Jordanova, 2017; Orchard, 2003).

Мета досліджень:

1. Моделювання способу дистанційного (безконтактного) визначення агрофізичних параметрів ґрунту індукційним методом.

2. Встановлення зв'язків агрофізичних параметрів ґрунту в змінному індукційному полі з магнітною проникністю ґрунту.

3. Дослідження впливу на процес дослідження взаємодії індукційного поля з ґрунтом вмісту вологи.

Матеріали і методи досліджень. Загальна методика рекомендувала дослідження передумов з пошуку раціонального технологічного рішення з дослідження магнітної проникності для визначених умов та перевірку процесу взаємодії індукційного поля з ґрунтом.

Аналітичні дослідження принципів взаємодії магнітного поля з діа- та парамагнетиками виконувались на основі відомих методів дослідження властивостей речовини з метою обґрунтування процесів взаємодії індукційного поля з ґрунтом.

Експериментальні дослідження виконувались на основі відомих методів дослідження магнітної проникності і побудови графіку гістерезису з використанням осциллографування та вимірювання частоти за зміною агрофізичних параметрів дослідних зразків. Порядок виконання досліджень узгоджено з рекомендаціями теорій планування факторного експерименту.

Для обробки експериментальних даних застосовувались методи обробки і порівняння відповідно до правил математичної статистики та теорії ймовірності з застосуванням моделювання в програмному комплексі STATISTICA.

Результати досліджень. Магнітні властивості ґрунту проявляються струмами, що виникають за рахунок обертання електронів, як навколо ядра так і навколо своєї осі за рахунок коливання власних орбіт що можуть бути характеризовані Ларморовою прецесією. Магнітні моменти атомів змінюють свій напрям під дією зовнішнього магнітного поля (Lundren at all, 2013; Ruh at all., 2019; Rekveldt, 2002; Ruh at all, 2019; Saidati&Naima, 2023; Bariakhtar at all, 2019).

Магнітна сприйнятливості χ зв'язана відношенням власної намагніченості одиниці маси до напруженості намагнічуючого магнітного поля (Selwood, 1958):

$$\chi = \frac{M}{H}; \quad (1)$$

де M – намагніченість середовища, або магнітний момент одиниці об'єму речовини, А/м; H – напруженість намагнічуючого магнітного поля, А/м.

Магнітна сприйнятливості χ є безрозмірною величиною. Магнітна сприйнятливості може бути перерахована в магнітну проникність μ :

$$\mu = 1 + \chi. \quad (2)$$

Напруженість намагнічуючого поля H та індукція B в ґрунті пов'язані залежністю:

$$B = \mu \cdot H. \quad (3)$$

Магнітну проникність можна знайти на основі побудованої кривої гістерезису для змінного магнітного поля (рис. 1).

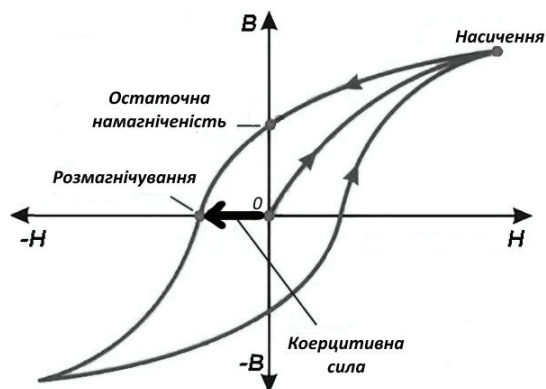


Рис. 1. Крива намагніченості (Магнітний гістерезис)

Відомо, що діамагнетики та парамагнетики мають відносно невеликі значення магнітної проникності в зв'язку з чим магнітну проникність доцільно досліджувати шляхом дослідження енергозатрат приросту магнітної індукції на ділянках кривої намагнічування або розмагнічування (рис. 2).

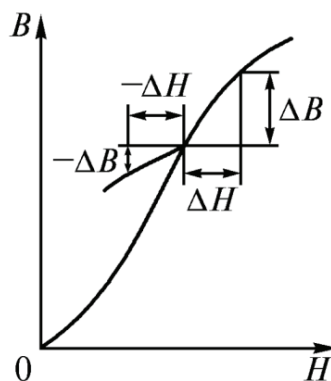


Рис. 2. Схема визначення значень магнітної проникності μ

В процесі намагнічування ґрунту в доменних структурах відбуваються процеси зміщення та обертання спінів, що на різних ділянках кривої намагнічування залежать від магнітної структури, наявності дефектів та пустот, форми та інших факторів що впливає на криву

намагнічення шляхом дії розмагнічуючого фактора (Кое-рецитивної сили) (Bilecckiy, 2004).

Магнітна сприйнятливості одиниці маси ґрунту, або питома магнітна сприйнятливості:

$$\chi_{num} = \frac{\chi}{\rho} \quad (4)$$

де ρ – щільність ґрунту, г/см³.

Відомо, що енергія магнітного поля W , затрачена на намагнічування зразка ґрунту (Syrotiuk, 2019) може бути визначена як:

$$W = \int_V w dV \quad (5)$$

де w – щільність енергії магнітного поля, Дж/м³;

За своїм значенням це робота, необхідна для збільшення магнітної індукції в одиниці об'єму магнетика.

У випадку визначеної магнітної проникності та лінійних зв'язків щільність енергії магнітного поля:

$$w = \mu\mu_0 \int H dH = \frac{HB}{2} \quad (6)$$

де μ_0 – магнітна проникність вакууму, 1.257 10⁻⁶ Гн/м;

За умов нелінійної, але однозначної залежності $B(H)$ вся робота намагнічування витрачається на збільшення енергії магнітного поля. З геометричної точки зору визначений інтеграл чисельно рівний площі під графіком функції $H(B)$. Повна робота джерела намагнічування витрачена під час збільшення індукції від нуля до значення B_1 рівна площі OAB_1 (рис. 3) обмеженою кривою намагнічування та відрізком OB_1 .

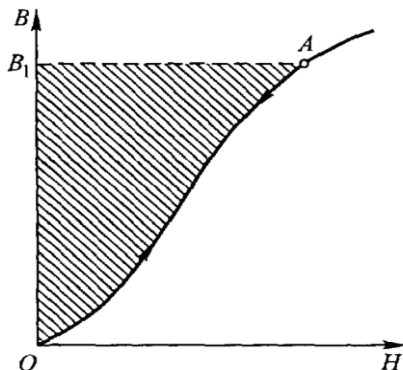


Рис. 3. Схема визначення витрат енергії на намагнічування за збільшення індукції

Для визначення магнітної проникності використовують генератори та трансформатори змінного магнітного поля. Для обчислення значень перспективним є метод еквівалентних синусоїд (метод розрахунку за дійсними значеннями). Перехід до еквівалентних синусоїд виконують шляхом заміни петель гістерезису $B(H)$ еквівалентними еліпсами на основі визначення зсуву фази коливань напруженості та індукції (рис. 4).

Встановлено, що під час визначення магнітної проникності виникають систематичні похибки обумовлені магнітною в'язкістю досліджуваних зразків (Müller 2001, Khilov, 2018), якою називають відставання зміни

магнітного потоку досліджуваного зразка від зміни напруженості намагнічуючого поля.

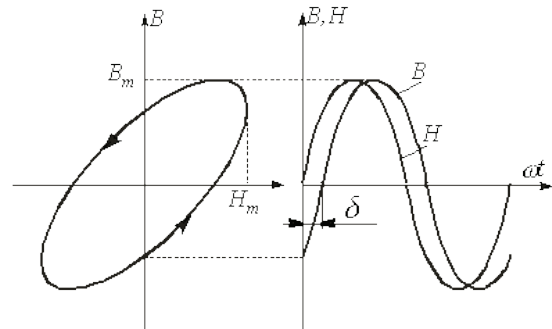


Рис. 4. Схема еліпса еквівалентного петлі гістерезису

При повному циклі перемагнічування в кожен одиницю об'єму ґрунту вводиться енергія, чисельно рівна площі петлі гістерезису що використовується на подолання коерцитивних сил і в результаті переходить в тепло (Róžański, 2022). При знакозмінних значеннях магнітного поля енергія визначається не тільки гістерезисом, а й вихровими струмами що спричинені магнітним потоком. Еквівалентний еліпс, що замінює криву гістерезису може бути визначений шляхом вирішення параметричних рівнянь:

$$H = H_m \sin \omega t; \quad (7)$$

$$B = B_m \sin(\omega t - \delta); \quad (8)$$

де H_m – змінна напруженість магнітного поля, А/м; B_m – змінна індукція магнітного поля в ґрунті, А/м; ω – кутова частота, рад/с; t – період коливань ($t = 2\pi$); δ – кут втрат, що визначає потужність на намагнічування одиниці об'єму за один цикл перемагнічування (фазовий зсув), рад/с.

Після вирішення рівнянь фазовий зсув можна визначити за рівнянням:

$$\delta = 2\pi \frac{\Delta T}{T}; \quad (9)$$

де T – період коливань, с; ΔT – доля періода, зміщена по фазі при співставленні синусоїд, с.

Встановлено (Kalashnykov, 2008; Khilov 2018; Variakhtar at all, 2019), що фазовий зсув спричинено ЕРС самоіндукції в змінному магнітному полі що можна фіксувати як опір генерації кількості циклів перемагнічування за одиницю часу через визначення індуктивності. Індуктивність котушки можна визначити за формулою:

$$L = \mu_0 \mu \cdot N^2 \frac{S}{l}; \quad (10)$$

де N – число витків котушки; S – площа поперечного перерізу котушки, м²; l – довжина котушки, м.

Для досліджень використано індукційний метод з використанням диференціальної коливальної системи. Принципову схему установки наведено на рис. 5, тестовий зразок реалізований за цією схемою на фото наведеному на рис. 6. Установка виконана на основі LC генератора синусоїдальних коливань (генератор Хартлі)

з індукційною котушкою-трансформатором, як сенсорним елементом і коефіцієнтом трансформації 3.0.

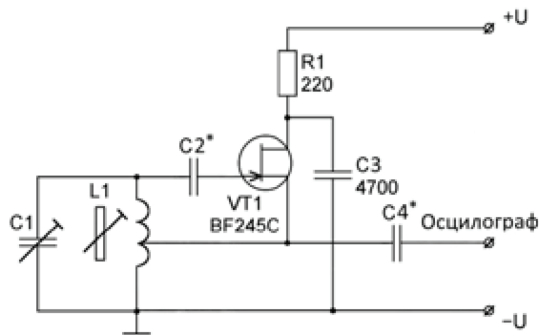


Рис. 5. Принципова схема виміральної установки

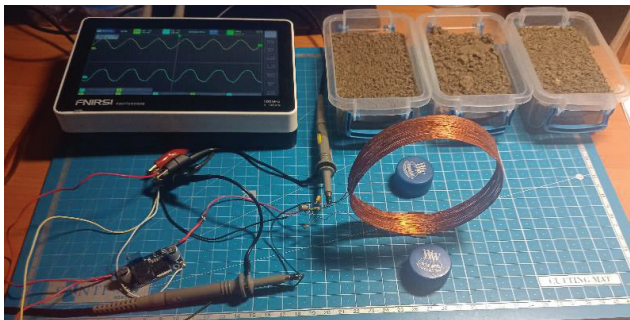


Рис. 6. Прилади і обладнання (основні)

Під час роботи генератора в сенсорній котушці утворюється знакозмінне магнітне поле що взаємодіє із зразками ґрунту і спричиняє їх намагнічування та розмагнічування. Індуктивні котушки містять 10 та 30 витків, які

виконано безкаркасними із діаметром $\varnothing 100$ мм. До генератора під'єднано напругу від лабораторного блока живлення. Для вимірювань використовувався осцилограф FNIRSI-1013. Робоча частота генератора f_0 :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_r C_1}}; \quad (11)$$

де f_0 – частота коливань генератора, Гц; L_r – індуктивність котушок (взаємна), Гн; C_1 – ємність конденсатора, Ф.

Шляхом підстановки (10) в (11) та проведення нескладних математичних перетворень, магнітна проникність ґрунту визначається як:

$$\mu = \frac{l}{(2\pi f_0)^2 \cdot \sqrt{C_1} \cdot \mu_0 \cdot N^2 \cdot S}; \quad (12)$$

де μ – магнітна проникність ґрунту.

Для обґрунтування методу необхідно дослідити зміну параметрів роботи генератора залежно від режимів його роботи, щільності та абсолютної вологості відібраних зразків ґрунту. Об'єм кожного зразка складав 200 мл. Зразки попередньо осушені та зважені з точністю до 0.01 г. В процесі виконання досліджень до кожного зразка додавалось по 20 мл. води. Оскільки магнітний потік має нерівномірний розподіл по об'єму котушки, для дослідження зв'язків щільності та вологості ґрунту h було обрано відхилення частоти Δf від частоти генератора f_0 .

Найбільший вплив на магнітну проникність мають насипна щільність ґрунту, амплітуда та частота циклів перемагнічування за 1 с. В якості залежної змінної обрано частоту відхилення Δf від частоти генератора за відсутності проб в індукційному полі. Для перевірки адекватності досліджень обрано моделі другого порядку та центральний композиційний план 3^2 (Таблиця 1–2).

Таблиця 1

Розподіл факторів дослідження для побудови графіків поверхні

Фактор	Нижнє значення	Нижня межа	Середнє значення	Середня межа	Верхнє значення	Верхня межа
Амплітуда, В	5	-1	10	0	15	+1
Частота, МГц	0,825	-1	1,3	0	1,85	+1
Щільність ґрунту, г/см ³	1	-1	1,2	0	1,4	+1

Таблиця 2

План та результати повного факторного дослідження 3^2

Амплітуда, В	Частота, МГц	Щільність ґрунту, г/см ³	Δf , кГц	$\Delta f, h = 10\%$, кГц	$\Delta f, h = 20\%$, кГц	$\Delta f, h = 30\%$, кГц
5,0	0,83	1,0	0,7	0,8	1,0	1,0
5,0	0,83	1,4	0,8	0,9	0,95	1,0
5,0	1,85	1,0	6,4	7,8	8,6	9,2
5,0	1,85	1,4	8,5	8,6	9,5	8,6
15,0	0,83	1,0	0,8	1,1	1,0	1,0
15,0	0,83	1,4	0,9	0,9	1,0	1,0
15,0	1,85	1,0	8,7	10,9	11,0	11,5
15,0	1,85	1,4	10,7	11,4	12,0	12,0
10,0	1,30	1,2	3,4	3,2	3,4	3,4
5,0	1,30	1,2	3,0	3,4	3,5	3,6
15,0	1,30	1,2	0,7	0,9	0,9	1,0
10,0	0,83	1,2	6,3	10,5	11,4	11,7
10,0	1,85	1,2	3,5	3,4	3,7	4,0
10,0	1,30	1,0	4,0	3,6	3,7	3,7
10,0	1,30	1,4	2,1	3,4	3,4	3,8
10,0	1,30	1,2	3,0	3,4	3,3	4,2

Для обґрунтування адекватності моделей другого порядку програмними засобами STATISTICA виконано дисперсійний аналіз (табл. 3) та побудовано діаграму розподілу квадратичних членів (рис. 7).

Таблиця 3

Результати дисперсійного аналізу

Фактор	SS	сс	MS	F	p
(1)Амплітуда, В(L)	0,5624	1	0,56236	7,030	0,229611
Амплітуда, В(K)	1,7608	1	1,76078	22,010	0,133697
(2)Частота, МГц(L)	80,0890	1	80,08900	1001,112	0,020114
Частота, МГц(K)	14,0560	1	14,05600	175,700	0,047937
(3)Щільність ґрунту, г/см ³ (L)	0,5636	1	0,56361	7,045	0,229378
Щільність ґрунту, г/см ³ (K)	0,3862	1	0,38624	4,828	0,271898
1L на 2L	2,2309	1	2,23086	27,886	0,119145
1L на 3L	0,0012	1	0,00125	0,016	0,920833
2L на 3L	1,8388	1	1,83878	22,985	0,130911
Потеря согл.	53,7041	5	10,74083	134,260	0,065425
Чист. помилка	0,0800	1	0,08000		
Общая SS	156,3544	15			

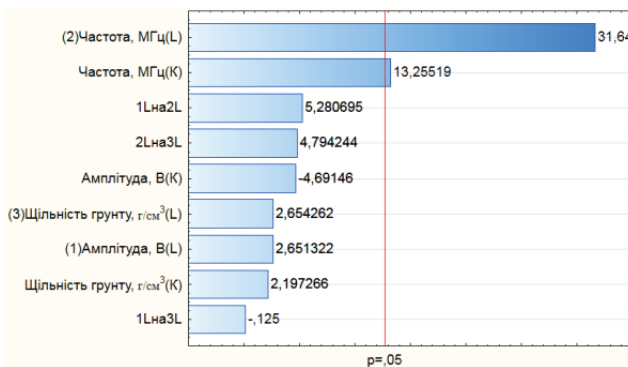


Рис. 7. Карта Паретто ефектів

З таблиці 3 можна зробити висновок, що статистично значимий вплив ($p < 0,05$) на результат визначення зв'язків між щільності та вологості ґрунту мають квадратичні члени частоти індукційного поля, що підтверджено картою Паретто, де відповідні колонки перетинають лінію довірчої ймовірності в 95%. У цьому разі основною задачею аналізу було оцінка відхилень частоти коливань генератора від зміни магнітної проникності ґрунту в індукційному полі за різних умов взаємодії залежно від наявності вологи.

Для дослідження нелінійності області визначених значень побудовано графіки поверхонь що дали можливість виконати оцінку відхилення Δf залежно від умов взаємодії магнітного поля з різними за щільністю та вологістю зразками ґрунту (Рис. 8–13).

Оскільки основною метою досліджень було встановлення зв'язків знакозмінного магнітного поля з агрофізичними показниками ґрунту на основі експериментальних досліджень побудовано графіки поверхонь впливу щільності ґрунту на показники відхилення Δf , що можуть бути калібрувальними за умов врахування розташування зразків ґрунту в просторі індукційного поля котушки для частоти циклів перемагнічування 1,3 та 1,85 МГц.

За результатами експериментальних досліджень взаємодії знакозмінним магнітним полем з сухим ґрунтом (рис. 8, 10, 12) та аналізу отриманих результатів встановлено, що для визначеної щільності 1,0 г/см³ на відхилення частоти генератора Δf впливає частота циклів перемагнічування.

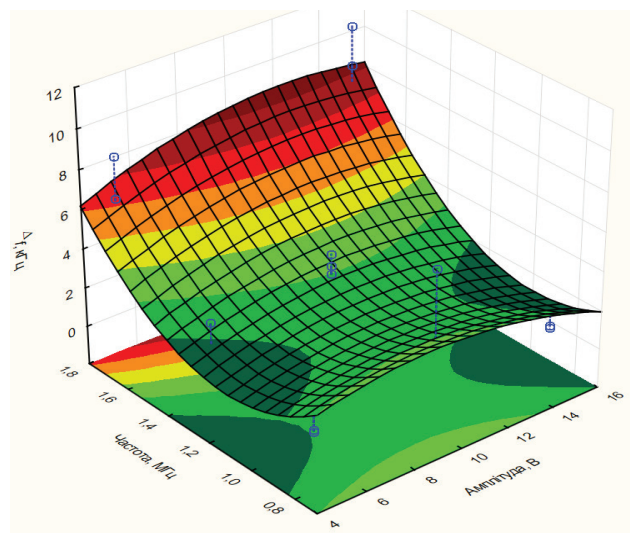


Рис. 8. Графік поверхні зв'язків амплітуди, частоти циклів і відхилення Δf сухого ґрунту, $\rho = 1,0$ г/см³

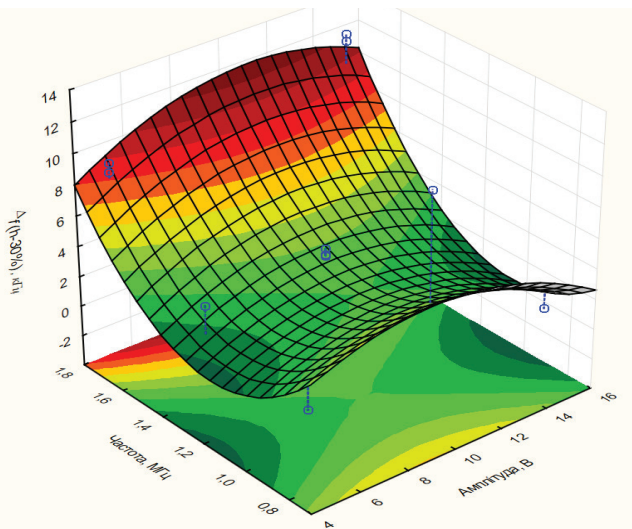


Рис. 9. Графік поверхні зв'язків амплітуди, частоти поля і відхилення Δf ґрунту $\rho = 1,0$ г/см³, $h = 30\%$

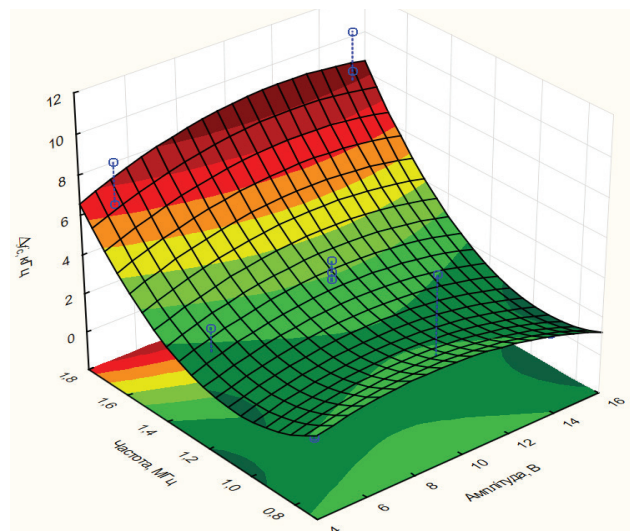


Рис. 10. Графік поверхні зв'язків амплітуди, частоти поля і відхилення Δf для сухого ґрунту $\rho = 1,2$ г/см³

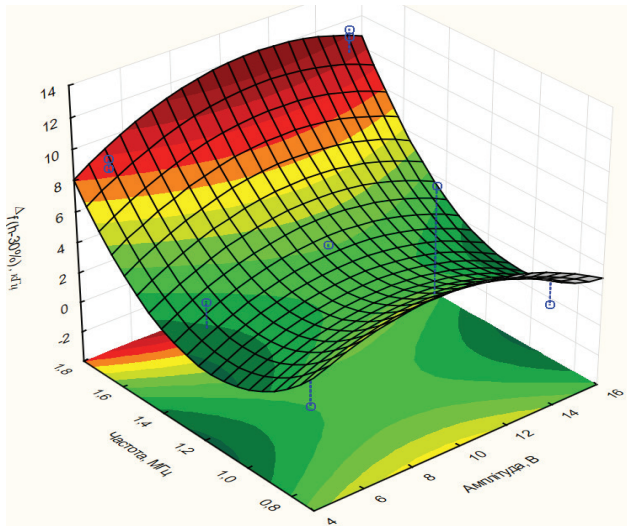


Рис. 11. Графік поверхні зв'язків амплітуди, частоти поля і Δf для ґрунту $\rho = 1,2 \text{ г/см}^3$, $h = 30\%$

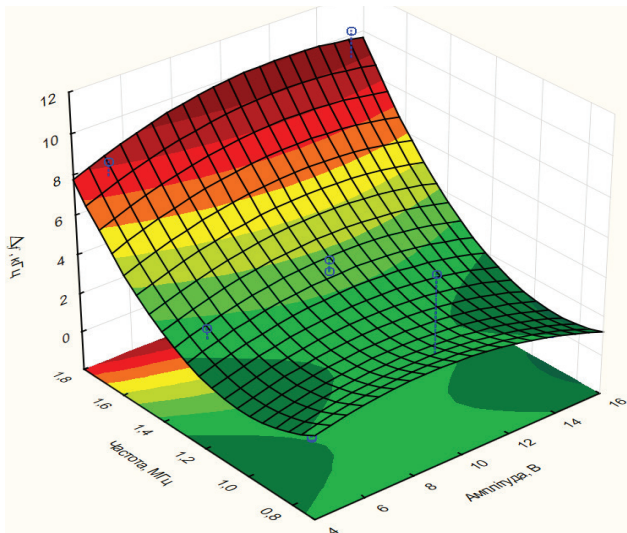


Рис. 12. Графік поверхні зв'язків амплітуди, частоти поля і відхилень Δf сухого ґрунту $\rho = 1,4 \text{ г/см}^3$

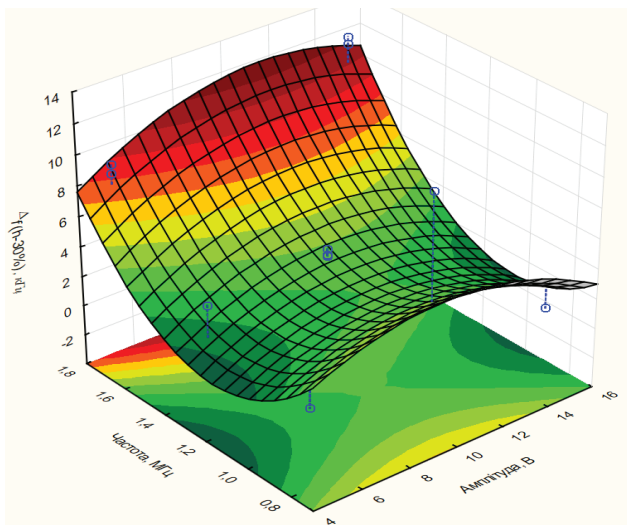


Рис. 13. Графік поверхні зв'язків амплітуди, частоти поля і відхилень Δf для ґрунту $\rho = 1,4 \text{ г/см}^3$, $h = 30\%$

Дослідженнями встановлено що за збільшення частоти циклів перемагнічування для сухого ґрунту щільністю 1.0 г/см^3 з 0.825 МГц до 1.85 МГц на 220% відхилення частоти генератора збільшилось з 0.7 кГц до 6.4 кГц на 914% , (рис. 8) що може бути обумовлене магнітною в'язкістю.

За результатами досліджень зразків ґрунту за зміни вологості $10, 20, 30\%$ (рис. 11, 13, 15) встановлено, що наявність води суттєвих відхилень в процесі знакозмінного намагнічування індукційним полем не вносить. Змінювались лише відхилення частоти генератора Δf пропорційно збільшенню показників щільності ґрунту.

Дослідження магнітної проникності ґрунту дозволили побудувати поверхню відгуку значень відхилень Δf залежно від частоти циклів перемагнічування ґрунту (рис. 14–15).

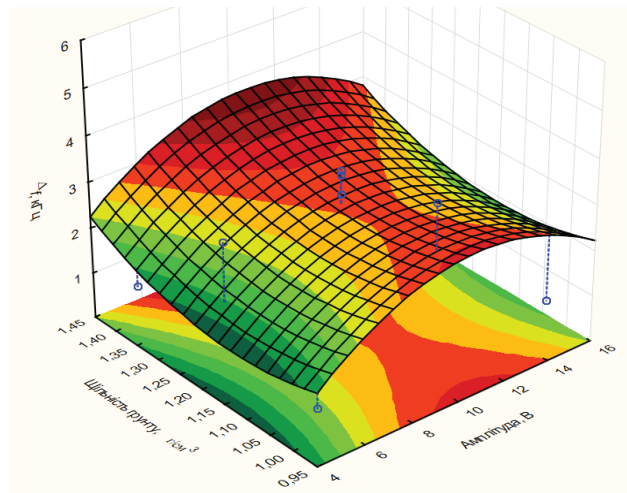


Рис. 14. Графік поверхні зв'язків щільності сухого ґрунту та відхилень Δf . Частота 1.3 МГц

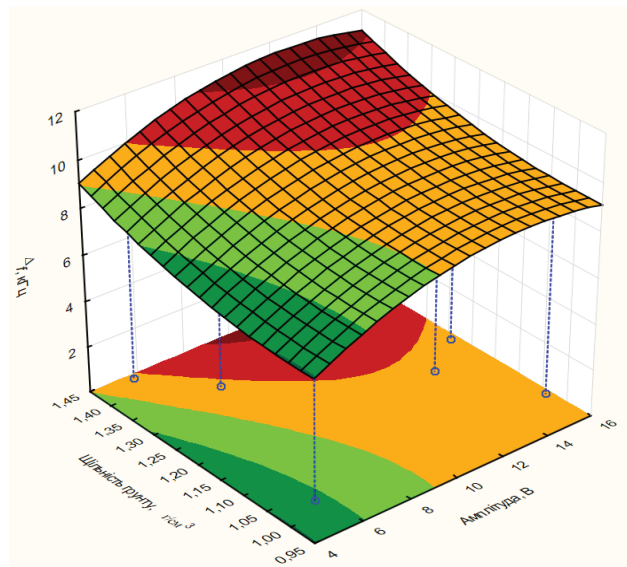


Рис. 15. Графік поверхні зв'язків щільності сухого ґрунту та відхилень Δf . Частота 1.85 МГц

Обговорення. В дослідженнях (Kravchuk at all, 2022; Anyskevich at all, 2018; Freddy at all, 2021; Kravchuk at all, 2023) перспективними напрямками розвитку засобів

визначення агрофізичних показників є вивчення зміни характеристик електромагнітного поля від агрофізичних показників ґрунту.

Дослідженнями (Anyskevich at all, 2018; Shahadat Hossain at all, 2020; Yang at all, 2022) підтверджено, що контактні методи вимірювання агрофізичних характеристик базуються на принципах вимірювання діелектричної проникності між зануреними в ґрунт електродами. Більшість пристроїв таким способом визначають вологість, температуру та ємність катіонного обміну.

Проаналізувавши дослідження (Dlouhá at all, 2013; Hanxiao at all, 2022; Kravchuk at all, 2022; Sashini at all, 2023) можна зробити висновок, що безконтактні методи потокового визначення агрофізичних характеристик ґрунту функціонують шляхом визначення здатності електромагнітного поля взаємодіяти з оброблюваним шаром ґрунту. Безконтактні вимірювання можна розділити на методи визначення вихрових струмів та методи радіозондування.

За дослідженнями (Kamran at all, 2023; Mohamed at all, 2018; Jordanova 2017) встановлено, що перспективними напрямками розвитку засобів визначення щільності та гранулометричного складу є вивчення зміни характеристик намагнічення ґрунту залежно від показників індукційного поля.

Очевидно, що найбільш перспективним для потокового визначення щільності ґрунту є індукційні методи вимірювання магнітної сприйнятливості (Lawrence, 2011; Lundgren at all, 2013) що широко застосовують в металодетекторах, засобах магнітної дефектоскопії ферромагнетиків та біохімії.

Для визначення характеристик кореневмісного шару актуальним завданням є вивчення селективних зв'язків магнітної проникності складових елементів ґрунту та визначення питомих затрат енергії на перемагнічування. Також актуальним завданням є вивчення імпульсної взаємодії індукційного поля з вмістом оксиду алюмінію, оксиду кремнію та води, що є основними складовими елементами ґрунту з використанням явища резонансу (FarzadShirzaditabar at all, 2022).

Висновки. Запропонований індукційний метод дистанційного (безконтактного) визначення щільності та пористості ґрунту може бути перспективним, та адаптованим до умов сучасного землеробства, за використання відомих знакозмінних магнетохімічних характеристик ґрунту.

На основі результатів досліджень встановлено, що вологість ґрунту в діапазоні досліджень 0,825–1,850 МГц суттєвого впливу на значення не спричиняла. Зміна показників відхилення Δf в значній мірі обумовлена збільшенням щільності зразків з ґрунтом.

Бібліографічні посилання:

1. Alekseev A. Magnetic Properties of Soils. *Encyclopedia of Agrophysics. Encyclopedia of Earth Sciences Series /* Gliński, J., Horabik, J., Lipiec, J. (eds). Dordrecht : Springer, 2011. doi: 10.1007/978-90-481-3585-1_86
2. Anyskevich L.V., Voytuk D.G., Zaharin F.M., Ponomarenko S.O. Systema tochnogo zemlerobstva – [Precision farming systems]. Kyiv : NUBiP Ukrainy, 2018. 566 p. [in Ukrainian]
3. Bariakhtar V.G., Dovguy S.O., Bozhynova F.Y., Kiriukhina O.O. Fizika : Pidruchnyk dlia 11 klasu – [Physics : a textbook for the 11th grade]. Kharkiv : Ranok, 2019. 272 p. [in Ukrainian]
4. Biletskyi V.S. Mala hymnicha encyclopedia. U 3 t. T1 – [Small chemical encyclopedia. In 3 volumes. Vol. 1]. Donetsk : Donbas, 2004. 640 p. [in Ukrainian]
5. Dlouhá Š., Petrovský E., Kapička A., Borůvka L., Ash C., Drábek O. Investigation of polluted alluvial soils by magnetic susceptibility methods: a case study of the Litavka River. *Soil and Water Research*. 2013. Vol. 151. P 151–157. doi: 10.17221/14/2013-SWR
6. Farzad Shirzaditabar and Richard J.Heck. Characterization of soil magnetic susceptibility: a review of fundamental concepts instrumentation and applications. *Canadian Journal of Soil Science*. 2022. Vol. 102(2). P. 231–251. doi: 10.1139/cjss-2021-0040
7. Freddy A., Diaz-Gonzalez, Jose Vuelvas, Carlos A. Correa, Victoria E. Vallejo, D. Patino. Machine learning and remote sensing techniques applied to estimate soil indicators : review. *Ecological Indicators*. 2021. doi: 10.1015/j.ecolind.2021.108517
8. Hanxiao X., Yingui C., Gubai L. Variability in reconstructed soil bulk density of a high moisture content soil, a study on feature identification and ground penetrating radar detection. *Environ Earth Sci*. 2022. Vol. 81. doi: 10.1007/s12665-022-10365-1
9. Hossain M. Shahadat G.K., Mustafizur M. Rahman, Solaiman A.R.M., Alam M. Saiful, Rahman M. Mizanur & M.A. Baset Mia. Estimating Electrical Conductivity for Soil Salinity Monitoring Using Various Soil-Water Ratios Depending on Soil Texture. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 2020. P. 635–644. doi:10.1080/00103624.2020.1729378
10. Hudz' V.P., Primak I.D., Budyonny Yu.V., Tanchik S.P. Zemlerobstvo : textbook – [Agriculture : textbook]. Kyiv : Centr uchbovoi literaturi, 2010. 464 p. [in Ukrainian]
11. Ivaniuta M., Kravchuk V., & Ramus M. Forecast for the Adaptive Tillage System. *International Journal of Life Science and Agriculture Research*. 2023. Vol. 2(7). P.193–199. doi: 10.55677/ijlsar/V02I07Y2023-06
12. Kamran Azizi, Shamsollah Ayoubi, José A.M. Demattê. Controlling factors in the variability of soil magnetic measures by machine learning and variable importance analysis. *Journal of Applied Geophysics*. 2023. doi: 10.1016/j.jappgeo.2023.104944.
13. Khilov V.S. Teoreticni zasady ektrotehniki – [Theoretical Fundamentals of Electrical Engineering]. Dnipro, 2018. 445 p.
14. Kravchuk V.I., Sinchenko V.M., Ivaniuta M.V., Shustik L.P. Potokove vyznachennia shchilnosti hruntu: stan i prohnaz doslidzhen – [Current determination of soil density: research status and forecast]. *The latest technologies in the agroindustrial complex: research and management*. 2022. Vol. 30(44). P. 107–115. doi: 10.31473/2305-5987-2022-1-30(44)-11 [in Ukrainian]
15. Kravchuk V., Ivaniuta M., Bratishko V., Gumeniuk Y., Kurka V. ON-STREAM SOIL DENSITY MEASURING, INMATEH. 2023. P. 665–672. doi: 10.35633/inmateh-69-64

16. Lawrence Que. Physical methods in bioinorganic chemistry: spectroscopy and magnetism. University Science Books, 2011. P. 345–348.
17. Lundgren Julia & Grémiaux Alexandre & Eberhardt Jacob. Theoretical study of the interaction between an ion-protein complex and an extremely weak low-frequency combined magnetic field. 2013. doi: 10.13140/2.1.5057.9524
18. Mohamed Abdel-Mohsen & Paleologos Evan (2018). Magnetic Properties of Soils. doi: 10.1016/B978-0-12-804830-6.00015-6
19. Müller K.H. Magnetic Viscosity. 2001. doi: 10.1016/B0-08-043152-6/00869-X
20. Neli Jordanova. Soil Magnetism Applications in Pedology. Environmental Science and Agriculture. Academic Press, 2017. 445 p.
21. Orchard A.F. Magnetochemistry. Oxford Chemistry Primers. Oxford University Press, 2003. ISBN 0-19-879278-6.
22. Rekveldt M., Bouwman Wim, Kraan W.H., Grigoriev, S.V., Uca Okan & Keller T. Overview of new Larmor precession techniques. *Applied Physics*. 2002. Vol. A 74. P. 323–325. doi: 10.1007/s003390101096
23. Róžański Adrian. Relating thermal conductivity of soil skeleton with soil texture by the concept of “local thermal conductivity fluctuation”. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2022. Vol. 14. Iss. 1. P. 262–271. ISSN 1674-7755. doi: 10.1016/j.jrmge.2021.06.008
24. Ruh A., Kiselev V.G. Calculation of Larmor precession frequency in magnetically heterogeneous media. *Concepts Magn Reson*. 2019. Part A. doi: 10.1002/cmr.a.21472
25. Saidati Bouhlassa, Naima Bouhsane. Assessment of the impacts of land-use change and slope position on soil loss by magnetic susceptibility-based models. *International Journal of Sediment Research*. 2023. Vol. 38(3). P. 455. doi: 10.1016/j.ijsrc.2022.11.006
26. Sashini Pathirana, Sébastien Lambot, Manokarajah Krishnapillai. Ground-Penetrating Radar and Electromagnetic Induction. Challenges and Opportunities in Agriculture. Remote Sensing. 2023. Vol. 15(11). P. 2932. doi: 10.3390/rs15112932
27. Syrotiuk V.D., Miroshnychenko Yu.B. *Fizyka i astronomiia : pidruchnyk dlia 11 klasu – [Physics and astronomy : a textbook for the 11th grade]*. Kyiv : Geneza, 2019. 368 p. [in Ukrainian]
28. Volodin M.O. *Osnovy zemel'noho kadastru : navchal'nyy posibnyk – [Basics of land cadastre : tutorial]*. Kyiv : Instytut zmistu i metodiv navchannya MON Ukrainy, 2002. 352 p. [in Ukrainian]
29. Yang Y., Shang K., Xiao C., Wang C., Tang, H. Spectral Index for Mapping Topsoil Organic Matter Content Based on ZY1-02D Satellite Hyperspectral Data in Jiangsu Province. China. *ISPRS Int. J. Geo-Inf*. 2022. Vol. 11. P. 111. doi: 10.3390/ijgi11020111
30. Zhang X., Zhang J., Li L., Zhang Y., Yang G. Monitoring Citrus Soil Moisture and Nutrients Using an IoT Based System. *Sensors*. 2017. Vol. 17. P. 447. doi: 10.3390/s17030447

Kravchuk V.I., Doctor of Technical Sciences, Professor, Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Ivaniuta M.V., Candidate of Technical Sciences, Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Zaytsev Ye.O., Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Arendarenko V.M., Candidate of Technical Sciences, Poltava State Agrarian University, Poltava, Ukraine

Study of soil density by a non-destructive method

The article presents the results of theoretical and experimental determining the relationship between soil density and moisture content by the induction method. It is established that these characteristics can be described by second-order models and used to develop means for non-contact on-stream determination of soil density and structure. The determination of magnetic susceptibility is a promising method for the study of classes of substances, which allows determining the internal structure of substances and the nature of their interactions. In this case, the soil can be considered a magnetic material that interacts with a magnetic field, the characteristics of which can be determined by specific energy changes in the magnetization source. According to its chemical composition, soil can be classified as a composite material based on diamagnetic and paramagnetic. The dependence of magnetic permeability in the range of magnetic field changes of 0.85–1.85 MHz for a density of 1.0–1.4 g/cm³ and a moisture content of 0–30% were analyzed. The research results are promising for the development of technologies and means for remote determination of soil agrophysical parameters. The research results can be adapted to the determination of agrochemical composition that may be related to the magnetochemical parameters of the soil. The purpose of the research: Modeling of the method of remote (non-contact) determination of soil agrophysical parameters by induction method, establishing the relationship of soil agrophysical parameters in a variable induction field with soil magnetic permeability and the impact on the process of determining moisture content. Research methods: Analytical studies of the principles of interaction of a magnetic field with dia- and paramagnets. Experimental studies of the interaction of soil samples with an alternating induction field. Analysis of nonlinear models of soil-magnetic field interactions. Comparison of theoretical and experimentally obtained characteristics within the ranges of soil interactions with an induction field. Results of the study. Various means and methods of on-stream determination of magnetic permeability based on the magnetization curve are systematized. Promising methods of on-stream determination of soil density based on the characteristics of magnetic susceptibility and viscosity are substantiated.

Key words: Soil density, induction unruly method of soil research, magnetochemistry, magnetic permeability, magnetic hysteresis, magnetic viscosity, Larmor precession.