

**Олексій Васильович Красножон¹, Андрій Васильович Красножон²,
Андрій Віталійович Димерець³, Артем Вікторович Сигута⁴**

¹кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних та комп'ютерних систем
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: wingcommander2011@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2500-254X>

Scopus Author ID: 57190377188

²кандидат технічних наук, доцент кафедри електричної інженерії та інформаційно-вимірювальних технологій
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: red_john@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6215-7535>. Scopus Author ID: 57191825825

³аспірант кафедри електроніки, автоматики, робототехніки та мехатроніки, група АСД-122-22
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: andrey.dymerets@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7617-5291>. Scopus Author ID: 57204287360

⁴аспірант кафедри інформаційних та комп'ютерних систем, група АСД-122-22

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: syguta@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8328-1277>

КОМП'ЮТЕРНА МОДЕЛЬ ВИЯВЛЕННЯ МЕТАЛЕВИХ ПРЕДМЕТІВ ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТАЛОШУКАЧА ІНДУКТИВНОГО ТИПУ

Відомо, що на сьогодні задача пошуку металевих об'єктів, що знаходяться в землі або приховані за іншими перешкодами, вирішується за допомогою металошукачів або металодетекторів. Тривалий досвід їх експлуатації призвів до появи різноманітних видів і класів металошукачів, які відрізняються як самими параметрами, так і кількістю котушок та їх геометричними формами.

Метою написання цієї статті є побудова комп'ютерної моделі виявлення металевих об'єктів за допомогою найпоширенішого типу металодетекторів: одноконтурних резонансних індукційного типу. Як датчики виявлення об'єктів використовується система котушок індуктивності типу Double D.

У статті описано процес створення моделі та її налаштування засобами середовища COMSOL Multiphysics. У результаті застосування моделі було отримано залежності напруги, що наводиться в прийомній котушці системи, при переміщенні алюмінієвого об'єкта вздовж горизонтальної і вертикальної вісей системи, а також від діаметра і товщини самого об'єкта, який має циліндричну форму. Наведено залежність напруги, що наводиться у прийомній котушці та різниці фаз між струмами котушок від питомої електричної провідності об'єкта-мішені.

На основі отриманих залежностей було проведено оцінювання потенційної можливості гарантованого детектування алюмінієвого об'єкту системою котушок, а також надано пояснення щодо обмежень, які виникають.

Зроблено висновки стосовно можливих шляхів застосування отриманої математичної моделі, а також переваг, отриманих від її застосування.

Ключові слова: комп'ютерна модель; металошукач; індуктивність; система котушок double D; COMSOL Multiphysics; магнітне поле; радіус об'єкта.

Рис.: 8. Бібл.: 15.

Актуальність теми дослідження. Проблема ефективного пошуку різноманітних металевих предметів цікавить людство вже досить давно, особливо тих, що приховані під шаром ґрунту або замасковані відповідним чином. Саме для вирішення такого класу задач і створюються металошукачі або металодетектори. Однак, вирішення цієї проблеми може бути важливим не тільки для шукачів старовинних предметів та археологів, а і для пошуку вибухонебезпечних предметів, оскільки переважна більшість снарядів, мін і бомб мають металевий корпус, а також внутрішні механізми. Як зазначалося в [1], останнє твердження є дуже важливим, особливо в сучасних умовах повномасштабної війни, у яких перебуває Україна.

Постановка проблеми. Одними з найпоширеніших на сьогодні за співвідношенням ціна/якість виявлення є одноконтурні резонансні металошукачі індукційного типу. Робота такого пристрою базується на вимірюванні рівня напруги, що наведена в прийомній котушці індуктивності та яка викликана наявністю магнітного поля, що створюється вихровими струмами, які протікають у металевих об'єктах [2; 3]. Оскільки рівень напруги, що наводиться у прийомній котушці, є дуже малим (від одиниць

мілівольт), його точне вимірювання і фіксація є складною задачею, тому з метою підсилення наведеної напруги використовується коливальний контур, у якому до прийомної котушки паралельно під'єднується конденсатор. Спрощену схему одноконтурного резонансного металошукача індукційного типу показано на рис. 1 [4].

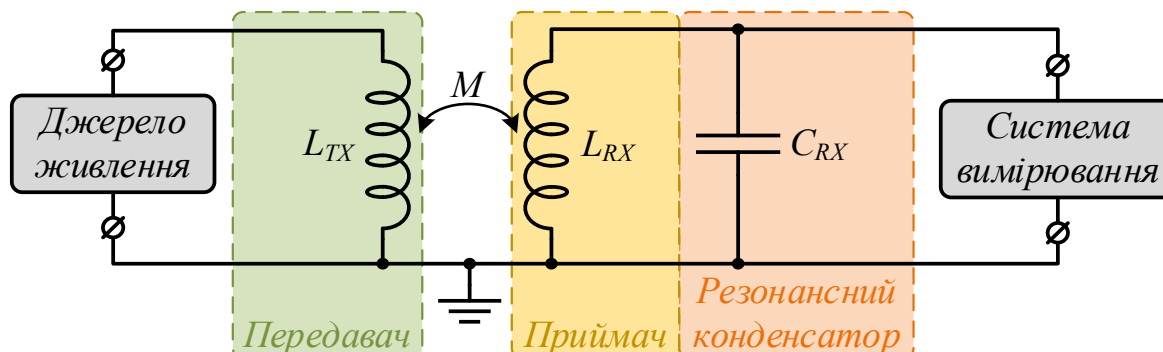


Рис. 1. Спрощена схема одноконтурного резонансного металошукача індукційного типу

Прийомну котушку (L_{RX}) паралельно з'єднано з конденсатором (C_{RX}), де при резонансі й буде відбуватися підсилення наведеної напруги.

Слід зауважити, що особливості побудови самого металошукача, а також його вимірювальних вузлів не є темою цієї статті.

Для опису й вимірювання параметрів процесів, які протікають у котушках, що генерують і сприймають магнітне поле (за відсутності інших феромагнітних середовищ чи матеріалів), використовується закон Біо-Савара-Лапласа, який дозволяє визначати індукцію магнітного поля \vec{dB} , яке створюється відрізком лінійного дроту \vec{dl} , по якому протікає деякий струм I у напрямку \vec{dl} у точці простору, віддаленій на відстань R від елемента струму за формулою [5; 6]:

$$\vec{dB} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \frac{[\vec{dl} \cdot \vec{R}_0]}{R^2}, \tag{1}$$

де μ_0 – магнітна проникність вакууму, що становить $4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Hn}{m}$;

\vec{R}_0 – одиничний вектор, проведений від \vec{dl} до точки простору, де і визначається магнітна індукція.

Результуюча магнітна індукція в точці простору визначається шляхом інтегрування по всій довжині (l) замкненого контуру за такою формулою [5; 6]:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \int_l \frac{[\vec{dl} \cdot \vec{R}_0]}{R^2}. \tag{2}$$

Таким чином, проблема розрахунку індукції магнітного поля, створеної котушкою в деякій довільній області (множині точок) простору, є досить складною і громіздкою для розв'язання математично. До того ж її складність прямо пропорційна кількості цих точок.

Слід також зазначити, що під дією магнітного поля в металевих об'єктах будуть наводитись вихрові струми (струми Фуко), розподіл яких визначити досить важко, але враховувати потрібно. Ці струми будуть створювати своє магнітне поле, яке буде також взаємодіяти із приймальною котушкою металошукача.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Використання металошукачів індуктивного типу для вирішення проблеми пошуку вибухонебезпечних предметів (снарядів, мін та ін.) залишається однією з найпоширеніших практик як у військовій справі, так і при гуманітарному розмінуванні [1; 2; 4; 9]. Їх використання дозволяє отримати певні переваги: порівняно низьку собівартість, відносно швидке навчання персоналу для користування такими металошукачами, простота налаштування і обслуговування. Однак питання підвищення ефективності їх застосування, збільшення швидкості пошуку вибухових предметів залишаються предметом досліджень [3; 10–13].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Як зазначалося вище, якщо величина магнітної індукції відома, то далі можна розрахувати магнітний потік крізь площину приймальної котушки металошукача за формулою (тут інтеграл слід брати по всій площині приймальної котушки) [5; 6]:

$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}. \quad (3)$$

Оскільки крізь котушку, що є джерелом магнітного поля, протікає змінний струм, то і магнітний потік крізь площину приймальної котушки також буде змінним. У свою чергу, ЕРС, яка буде наводитися у прийомній котушці, може бути визначена за правилом Ленца [5; 6]:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (4)$$

Одним із варіантів вирішення проблеми складних розрахунків індукції магнітного поля та ЕРС є проведення натурального експерименту, для виконання якого необхідно виготовляти або купувати самі котушки, створювати відповідні умови, а також використовувати спеціалізовані вимірювальні прилади, які (залежно від класу точності й діапазону вимірювань) можуть коштувати дуже дорого.

Зважаючи на зазначене вище, для вирішення проблеми розрахунку параметрів магнітного поля, створеного котушками складної геометричної форми в присутності металевих об'єктів, запропоновано застосувати комп'ютерне моделювання, яке буде здійснюватися в середовищі COMSOL Multiphysics.

Мета статті. Метою статті є розробка комп'ютерної моделі виявлення металевих предметів за допомогою найпоширенішого класу металошукачів індуктивного типу в середовищі COMSOL Multiphysics, налаштування її параметрів, а також аналіз результатів моделювання із визначення можливих напрямів застосування створеної моделі.

Створення комп'ютерної моделі і налаштування її параметрів. Процес створення комп'ютерної моделі в середовищі COMSOL Multiphysics починається з вибору розмірності простору (одно-, дво- або тривимірний), у якому буде відбуватися моделювання. Оскільки обидві котушки одноконтурного резонансного металошукача індукційного типу, а також сам пошуковий предмет є тривимірними об'єктами, і розташовуються у просторі довільним чином, вибираємо тривимірну модель (3D).

На наступному кроці вибираються вбудовані в COMSOL інтерфейси, призначені для цільового моделювання в конкретній галузі (акустика, хімія, електрохімія, радіочастотна передача тощо) [7; 8]. Оскільки будь-який металодетектор є електромагнітним пристроєм, робота якого базується на генерації електромагнітного поля та вимірюванні його параметрів, до моделі підключається інтерфейс Magnetic Fields. Також додається інтерфейс Electric Circuit для побудови електричного кола (для резонансного конденсатора, підключеного до прийомної котушки).

Далі необхідно обрати розв'язувач, який буде виконувати розрахунки і шукати значення всіх параметрів, передбачених підключеними інтерфейсами (параметри електромагнітного поля, напруги та струми в електричному колі). Оскільки система

котушок буде утворювати змінне електромагнітне поле (у металошукачах, зазвичай, використовується діапазон частот від 3 КГц до 27 КГц [11, 12]) необхідно застосувати розв'язувач для частотної області Frequency Domain. Крім цього, для аналізу просторових параметрів системи котушок, що не є ні лінійними, ні спіральними необхідно підключити розв'язувач Coil Geometry Analysis. Також для проведення параметричних розрахунків (один або більше параметрів є змінними) треба додати інструмент Parametric Sweep.

Створення моделі на цьому етапі є завершеним, але вона все ще є порожньою. Для дослідження необхідно виконати такі етапи: побудувати геометрію моделі; визначити матеріали для кожного об'єкта; вказати взаємозв'язки побудованих геометричних об'єктів із елементами розрахункових модулів, наприклад, котушок; побудувати розрахункову сітку.

Найбільш поширеним зараз є використання так званої DD або Double D системи котушок індуктивності (рис. 2) [3; 9; 10].



Рис. 2. Зовнішній вигляд системи пошукових котушок Double D індукційного металошукача

Як джерело генерації і пристрою вимірювання електромагнітного поля тут використовуються котушки індуктивності D-подібної форми із різною кількістю витків і товщиною дроту, які розташовуються таким чином, що мають певну область перекриття по горизонталі, і розміщуються на певній відстані одна від одної по вертикалі [9]. Особливістю функціонування такої системи котушок є наявність так званої напруги “небалансу”, яка утворюється за рахунок того, що кількість ліній магнітного поля, яка пронизує приймальну котушку в прямому і протилежному напрямках не є однаковою. Типове значення цієї напруги становить до одиниць мілівольт [10]. Слід зауважити, що ця напруга буде неперервно наводитися у прийомній котушці навіть за відсутності будь-якого металевих об'єкта. У ролі параметрів для моделювання було обрано параметри реально існуючої системи Double D котушок для металошукача Fischer F5 [14]. Для вимірювання величин індуктивності та активного опору приймальної і генеруючої котушок було використано багатофункціональний прилад GM328A [15]. Зокрема, з'ясовано, що робоча частота цього металошукача становить 7700 Гц.

Усі параметри моделі можуть бути задані у вигляді чисел безпосередньо у відповідних полях або у вигляді списку іменованих значень у вкладці Parameters розділу Global Definitions. Для зручності налаштування та редагування моделі слід використовувати саме другий варіант.

Вміст таблиці параметрів моделі показано на рис. 3. Варто зазначити, що COMSOL Multiphysics підтримує можливість як безпосередньо задавати значення параметрів моделі, так і розраховувати одні параметри на основі значень інших [7]. Для поставленої задачі визначено такий список параметрів:

1. Ext_Coil_R – зовнішній радіус котушок системи (однаковий для обох котушок).
2. Thickness – загальна товщина кожної котушки.

3. Coil_alpha – центральний кут, на який опирається радіус випуклої частини кожної котушки.
4. p1, p2, p3, p4 – точки, що належать кривим, які описують зовнішній вигляд кожної із котушок індуктивності системи.
5. Turns_N_1 – кількість витків передавальної котушки.
6. Wire_S_1 – площа поперечного перерізу дроту передавальної котушки.
7. Wire_D – діаметр дроту, із якого виготовлено передавальну котушку.
8. Turns_N_2 – кількість витків прийомної котушки.
9. Wire_S_2 – площа поперечного перерізу дроту прийомної котушки.
10. Freq – частота змінного струму, що пропускається крізь котушку, яка генерує магнітне поле системи.
11. Res_Cap – ємність резонансного конденсатора, що підключений до прийомної котушки металошукача.
12. Coil_L – індуктивність прийомної котушки системи.
13. Coin_X – x-координата розташування центру металевго об’єкта-мішені.
14. Coin_Y – y-координата розташування центру металевго об’єкта-мішені.
15. Coin_Z – z-координата розташування центру металевго об’єкта-мішені.
16. Coin_R – радіус металевго об’єкта-мішені.
17. Coin_H – товщина металевго об’єкта-мішені.

Name	Expression	Value
Ext_Coil_R	150[mm]	0.15 m
Thickness	10[mm]	0.01 m
Coil_alpha	192.4[deg]	3.358 rad
p1	Ext_Coil_R*cos((360[deg]-Coil_alpha)/2)	0.0162 m
p2	p1-Thickness	0.0061999 m
p3	Ext_Coil_R-Thickness	0.14 m
p4	acos(p2/p3)	1.5265 rad
Turns_N_1	156	156
Wire_S_1	0.037[mm^2]	3.7E-8 m ²
Wire_D	sqrt(4*Wire_S_1/pi)	2.1705E-4 m
Turns_N_2	35	35
Wire_S_2	0.175[mm^2]	1.75E-7 m ²
Freq	7.7[kHz]	7700 Hz
Res_Cap	1/((2*pi*Freq)^2*Coil_L)	3.7972E-8 F
Coil_L	11.251[mH]	0.011251 H
Coin_X	0[mm]	0 m
Coin_Y	0[mm]	0 m
Coin_Z	-10[mm]	-0.01 m
Coin_R	25[mm]	0.025 m
Coin_H	5[mm]	0.005 m

Рис. 3. Найменування (Name) і значення (Value) параметрів моделі, заданих користувачем

Джерело: розроблено авторами.

Геометрична побудова фізичних об’єктів моделі може бути виконана за допомогою вбудованих інструментів Comsol Multiphysics або із використанням будь-якої іншої системи автоматизованого проектування. Для поточної задачі буде достатньо вбудованих інструментів.

Дерево геометричної побудови 3D-моделі та її результат зображено на рис. 4:

1. Верхня котушка побудована шляхом витягування у просторі (ext1) пласкої проєкції (wp1).
2. Нижня котушка побудована шляхом копіювання зі зміщенням (copy1) та віддзеркаленням (mir1) верхньої.

3. Металевий об’єкт, що буде детектуватися є простим циліндром (cyl1).

4. Розрахункова область циліндричної форми (cyl2).

Область, яку буде визначено як ґрунт, не створювалась окремо, адже електрична провідність ґрунту є дуже малою величиною (0,01 См/м) у порівнянні із провідністю металевого об’єкта ($38 \cdot 10^6$ См/м для алюмінію), і нею можна знехтувати.

Електромагнітне поле поширюється в усіх напрямках і стане рівним 0 при безмежному віддаленні від системи котушок, але нам необхідно знати параметри поля безпосередньо у просторі під котушками, тобто розрахунок параметрів на відстані, яка перевищує 0,5 м від системи котушок вгору чи у будь-який бік, не має сенсу. Для цього навколо основної розрахункової області виділено окремий зовнішній шар. Він необхідний для можливості задання безмежно віддаленої границі.

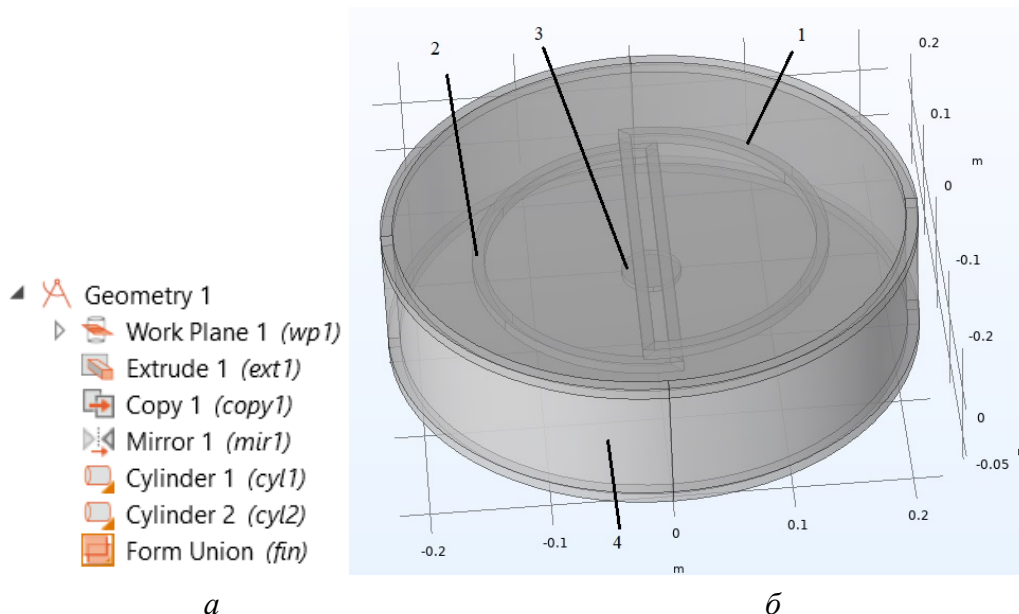


Рис. 4. Дерево геометричної побудови (а) та отримана тривимірна модель системи DD-катушок і металевого об’єкта-мішені (б)

Джерело: розроблено авторами.

Далі необхідно визначити матеріали кожного геометричного об’єкта, задати їхні властивості. У межах задачі необхідно вказати: відносну магнітну проникність μ_r ; відносну діелектричну проникність ϵ_r ; питому електричну провідність σ . Властивості матеріалів можна задавати як вручну, так і скористатися готовими бібліотеками. Для цієї моделі було використано матеріали із бібліотеки, наведеної в табл. 1.

Таблиця 1 – Перелік об’єктів моделі із визначеними матеріалами та параметрами

Об’єкт моделі	Матеріал	Параметри		
		μ_r	ϵ_r	σ , S/m
Катушки	Мідь	1	1	$6 \cdot 10^7$
Металевий об’єкт	Алюміній	1	1	$3.8 \cdot 10^7$
Розрахункова область	Повітря	1	1	10^{-6}

Джерело: розроблено авторами.

Для повітря задано ненульову електричну провідність з метою покращення збіжності рішення задачі розв’язувачем та прискорення процесу розрахунку [7], оскільки різниця між провідностями повітря, катушок та металевого об’єкта (яка складає 13 порядків) на точність розрахунку суттєво не вплине.

Наступним кроком необхідно налаштувати підключені до моделі інтерфейси Magnetic Fields та Electric Circuit (рис. 5). Інструментом Coil інтерфейсу Magnetic Fields задаються об'єкти, що є котушками (рис. 5, а). Для кожної з них задаються такі налаштування: котушки є багатовитковими; кількість витків; площа поперечного перерізу дроту. Далі для передавальної котушки (верхньої, Coil 1) задається струм, що створюється в ній джерелом живлення (0.1 А). Для прийомної котушки (нижньої, Coil 2) вказується підключення до електричного кола. У системі Double D немає принципової різниці, яка із двох котушок (приймна чи випромінююча) буде розташована вище за іншу [13]. В інтерфейсі Electrical Circuit задається під'єднання прийомної котушки (External I vs. U1) до резонансного конденсатора (Capacitor 1) (рис. 5, б).

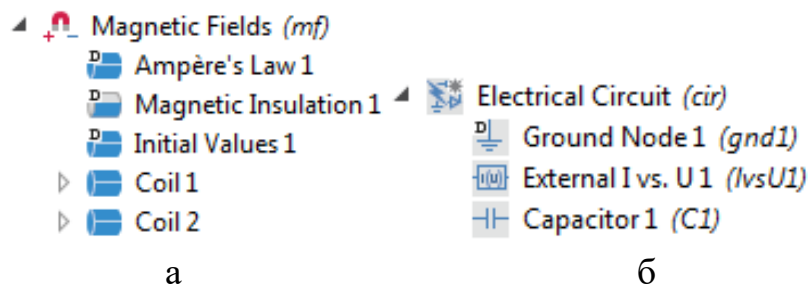


Рис. 5. Древа інтерфейсів моделі: Magnetic Fields (а) та Electric Circuit (б)
Джерело: розроблено авторами.

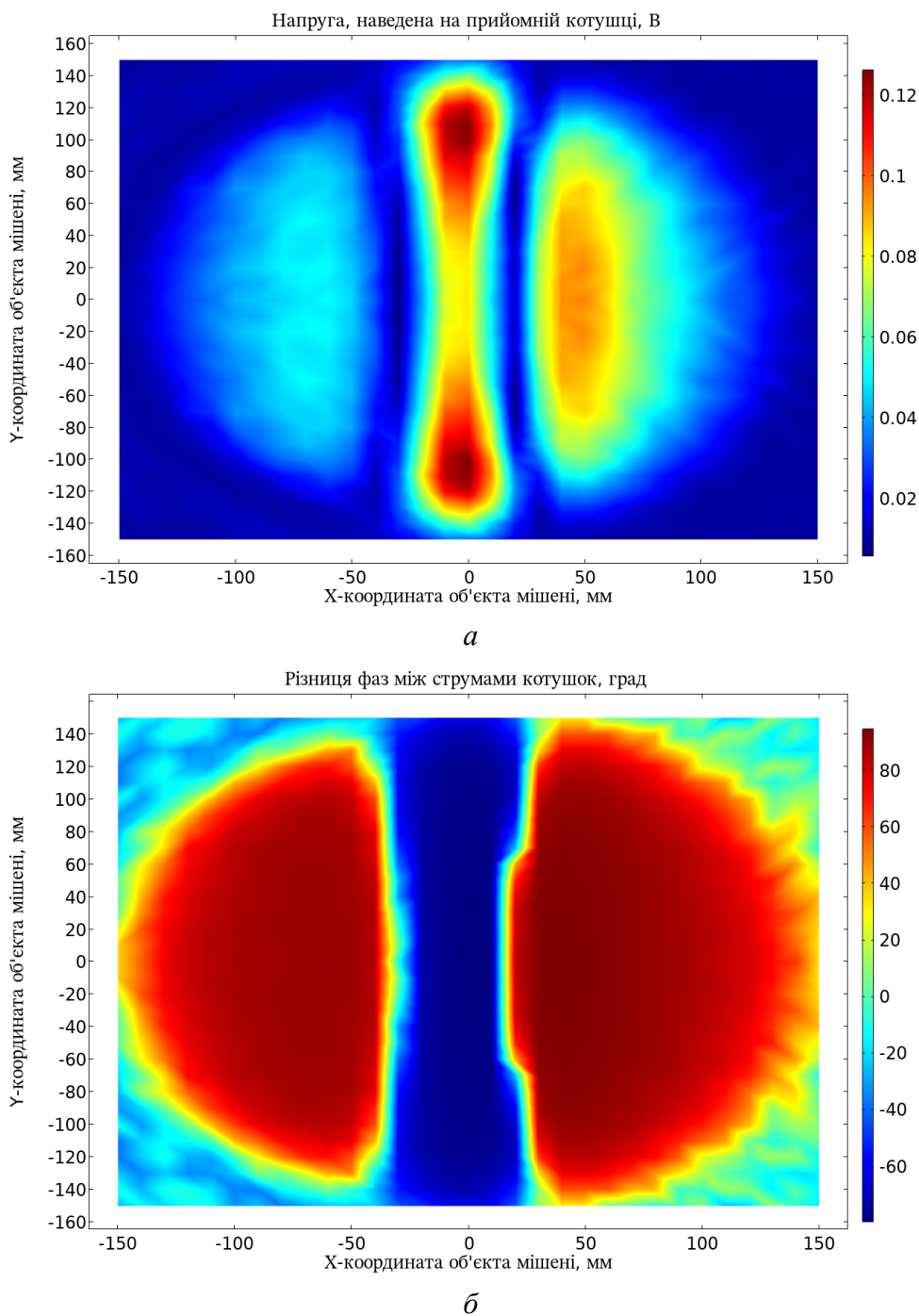
Останнім кроком є побудова сітки розрахунків (рис. 6). Цей етап є дуже важливим, адже від структури сітки залежить не лише точність розрахунку результатів, а також час моделювання і кількість задіяних апаратних ресурсів (оперативна пам'ять, завантаженість процесора та ін.).

Приклади застосування розробленої комп'ютерної моделі. Comsol Multiphysics дає можливість отримувати результати розрахунку в числовій та графічній формі. Для поставленої задачі, в якій необхідно досліджувати залежність напруги наведеної на прийомній котушці від багатьох параметрів металевих об'єктів, що знаходяться в електромагнітному полі системи котушок (форма, координата у просторі, розміри, матеріал) найбільш зручним є графічне представлення результатів у вигляді одновимірних графіків або двовимірних поверхонь (так званих кольорових карт).

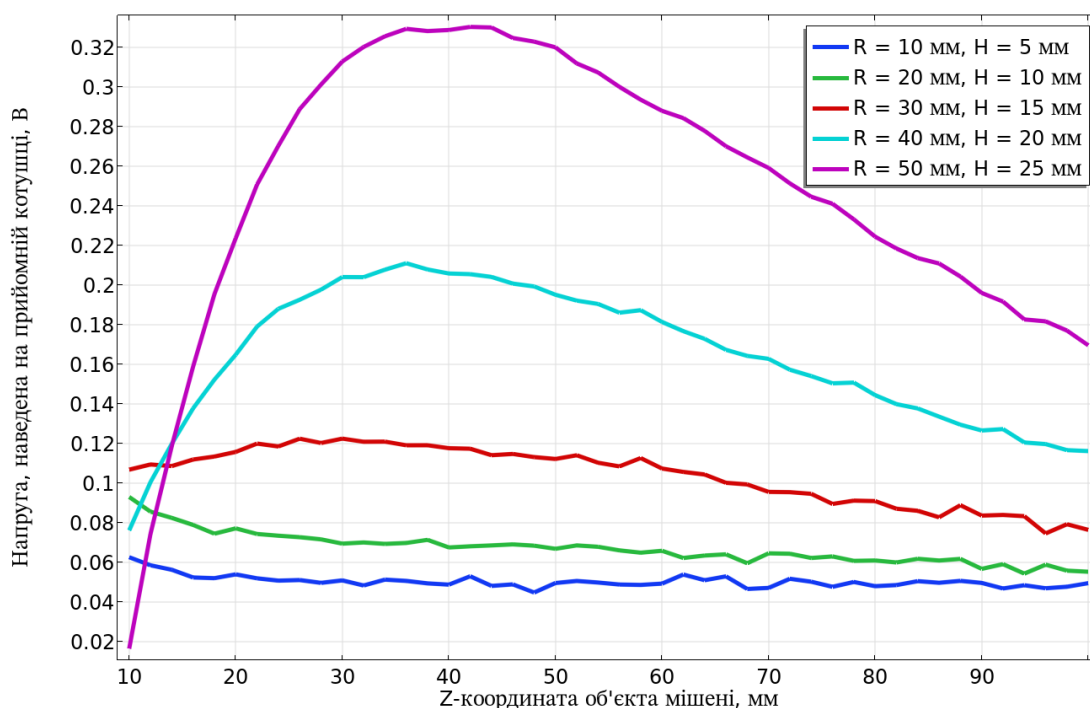
На рис. 6 зображено кольорові карти залежності напруги, що наводиться у прийомній котушці (рис. 6, а), а також різниці фаз струмів котушок (рис. 6, б) від горизонтального зміщення (в координатах X та Y) алюмінієвого об'єкта-мішені товщиною 5 мм і радіусом 25 мм відносно центру системи котушок в площині, паралельній до неї, при фіксованій вертикальній відстані (координата Z, -20 мм).

З рис. 6 видно, що зміна горизонтального розташування мішені суттєво впливає на напругу, що наводиться у прийомній котушці, причому спостерігаються локальні мінімуми в зонах, що знаходяться безпосередньо під витками котушок. Тобто наявність мішені буде виявлятися саме в процесі переміщення системи котушок над нерухомою мішенню. Напруга має величину, достатню для стійкого детектування (понад 100 мВ). Додаткове вимірювання зсуву фаз дозволить відрізнити положення мішені під зоною перетину котушок від зони, що знаходиться лише під однією з котушок.

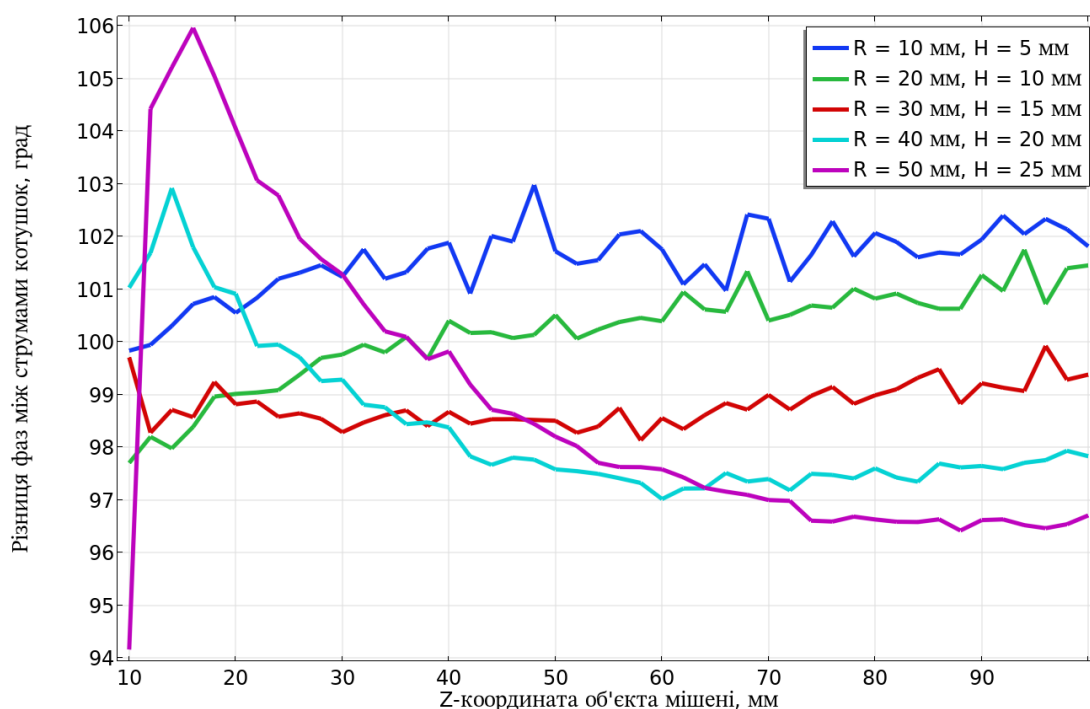
На рис. 7 зображено сімейства графіків залежності напруги, що наводиться у прийомній котушці (рис. 7, а), а також різниці фаз струмів котушок (рис. 7, б) від зміщення алюмінієвого об'єкта-мішені вздовж вертикальної осі (координата Z) за фіксованого горизонтального положення (координати X та Y) по центру системи котушок та різних розмірах об'єкта-мішені (радіуса R та товщини H).



*Рис. 6. Залежність напруги, що наводиться у прийомній котушці:
 а – та різниці фаз між струмами котушок;
 б – від положення металевого об'єкта-мішені в горизонтальній площині*
 Джерело: розроблено авторами.



a



б

Рис. 7. Залежність напруги, що наводиться у прийомній котушці:
 а – та різниці фаз між струмами котушок б – від положення металевого
 об'єкта-мішені на вертикальній осі при зміні його розмірів

Джерело: розроблено авторами.

Зі збільшенням розміру мішені відносно розмірів котушок системи напруга, що наводиться на прийомній котушці, загалом зростає, тобто об'єкти великого розміру будуть детектуватися набагато легше. Найменшу чутливість детектора при радіусі мішені

у 10 мм можна пояснити тим, що такий об'єкт найменшим чином впливає на нерівномірність магнітних потоків через різні частини площини, обмеженої приймальною котушкою. Графіки, подібні наведеним, дозволяють визначити глибину гарантованого детектування металевго об'єкта-мішені певної форми та розмірів.

Проаналізувавши рисунок також можна побачити, що для більших розмірів об'єкта-мішені максимальна напруга наводиться на прийомній котушці не на мінімальній відстані від системи котушок. Різниця фаз струмів при цьому змінюється не суттєво. Ламана форма графіка зумовлена перебудуванням сітки на кожній ітерації розрахунку (при зміні координати об'єкта-мішені), що призводить до несуттєвих змін результатів моделювання.

На рис. 8 зображено графіки залежності величини напруги (крива синього кольору), що наводиться у прийомній котушці, а також різниці фаз (крива зеленого кольору) струмів котушок від величини питомої електричної провідності об'єкта-мішені (діаметром 50 мм, товщиною 5 мм, що лежить на глибині 20 мм). Можна побачити, що наведена напруга в цьому випадку змінюється дуже слабо (менше ніж на 20 мВ), але помітно змінюється різниця фаз між струмами котушок, що може бути використано для детектування матеріалу, з якого виготовлено металевий об'єкт.

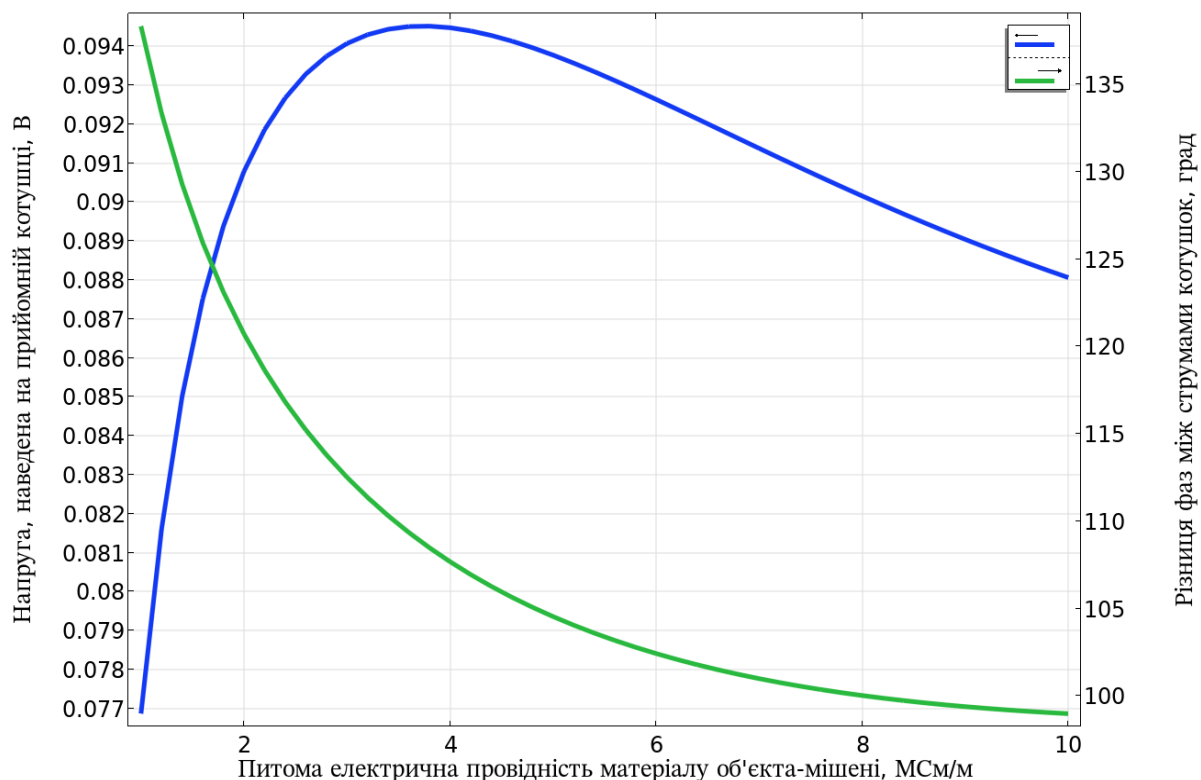


Рис. 8. Залежність напруги, що наводиться у прийомній котушці та різниці фаз між струмами котушок від питомої електричної провідності об'єкта-мішені
Джерело: розроблено авторами.

Висновки. У статті було побудовано й досліджено комп'ютерну модель процесу виявлення металевих об'єктів за допомогою одноконтурного резонансного металошукача індукційного типу в середовищі моделювання COMSOL Multiphysics. Запропонована модель дозволяє отримувати графічні залежності між різними параметрами та розраховувати їх значення. Як параметри в процесі моделювання було використано параметри реально існуючого металошукача Fisher F5, а також системи котушок індуктивності типу Double D до нього.

Як видно із результатів, наведених на рис. 6–8, величина напруги на прийомній котушці індуктивності системи знаходиться в діапазоні від одиниць до сотень мілівольт, відповідно, такої напруги буде достатньо для фіксації сучасними засобами вимірювання, що входять до складу металошукача.

Запропоновану й описану комп'ютерну модель можна використовувати для проведення віртуальних експериментів, що дозволяє:

- скоротити час вибору металошукача, в залежності від особливостей задачі, що вирішується, а також заощадити гроші на його купівлю;
- відшукувати форму котушок індуктивності, що найбільш оптимально підходить під конкретну задачу, оскільки, процес виготовлення котушок є дорогим та трудомістким, що істотно ускладнює проведення натурних експериментів;
- визначати, на якій відстані та глибині може знаходитися металевий об'єкт заданої форми, щоб його можна було гарантовано детектувати вибраною системою;
- визначати межі гарантованого детектування об'єкта залежно від металу, з якого він виготовлений, а також його геометричної форми та розмірів;
- визначати вплив середовища, у якому знаходиться металевий об'єкт, на межі області його детектування (за умови, якщо відповідне середовище буде додано до створеної тривимірної моделі);
- визначати межі гарантованого детектування металевих об'єктів залежно від частоти змінного струму, що пропускається крізь генеруючу котушку.

Список використаних джерел

1. Сигута, А. Дослідження методів пошуку вибухонебезпечних предметів / А. Сигута, О. Красножон // Технічні науки і технології. – 2024. – № 1(35). – С. 156-169.
2. Qun Guo. A Multiarray Electromagnetic Instrument for Shallow Surface Real-Time Detection / Qun Guo, Sirui Zhou, Xinhao Zhang, Caitang Sun, Gang Li // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2021. – Vol. 70. – Pp. 1-9.
3. Ambruš, D. A Portable Planar Coil Array for Frequency-Domain Inductive Sensing of Metallic Objects / D. Ambruš, D. Vasić, V. Bilas // 2020 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). – Dubrovnik, Croatia, 2020. – Pp. 1-5. DOI: 10.1109/I2MTC43012.2020.9128673
4. Цимбал, О. В. Дискримінація металів у металошукачах / О. В. Цимбал // Електронна та Акустична Інженерія. – 2019. – № 2(4). – С. 22–27. 2(4). DOI: <https://doi.org/10.20535/2617-0965.2019.2.4.163837>
5. Нейман, Л. Р. Теоретические основы электротехники : учеб. для электротех. и энерг. вузов : у 3-х ч. Ч. 3 : Теория электромагнитного поля / Л. Р. Нейман, П. Л. Калантаров. – Изд. 5-е, перераб. – М.-Л. : Госэнергоиздат, 1959. – 232 с.
6. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники: Электромагнитное поле : учебник для вузов / Л. А. Бессонов. – 7-е изд., перераб. и доп. – Москва : Высшая школа, 1978. – 231 с.
7. Introduction to COMSOL Multiphysics. – Accessed mode: <https://cdn.comsol.com/doc/5.5/IntroductionToCOMSOLMultiphysics.pdf>.
8. Dymerecs, A. V. Simulation of a Grid Multi-Layer Shield to Reduce the Magnetic Field of Power Lines / A. V. Dymerecs, A. V. Krasnozhan, O. V. Krasnozhan // Microsystems, Electronics and Acoustics. – 2020. – Vol. 25, №3. – Pp. 5-10.
9. Guelle, D. Metal detector handbook for humanitarian demining / D. Guelle, A. Smith, A. Lewis, T. Bloodworth. – Norwich: Office for Official Publications of the European Communities, 2003. – 180 p.
10. Ambrus, D. Comparative Study of Planar Coil EMI Sensors for Inversion-Based Detection of Buried Objects [Electronic resource] / Davorin Ambrus, Darko Vasic, Vedran Bilas // IEEE Sensors Journal. – 2020. – Vol. 20, no. 2. – Pp. 968-979. – Accessed mode: <https://doi.org/10.1109/jsen.2019.2944752>.
11. Scott, W. R. Array of broadband electromagnetic induction sensors for detecting buried objects / W. R. Scott // Proc. SPIE 10182, Detection and Sensing of Mines, Explosive Objects, and Obscured Targets XXII, 1018214 (3 May 2017). DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2262944>.

12.Scott, W. R. Broadband Array of Electromagnetic Induction Sensors for Detecting Buried Landmines / W. R. Scott // *IGARSS 2008 - 2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. – Boston, MA, 2008. – Pp. II-375-II-378.

13.Ambruš, D. Active induction balance method for metal detector sensing head utilizing transmitter-bucking and dual current source / D. Ambruš, D. Vasić, V. Bilas // *Journal of Physics Conference Series*. – 2013. – 450(1):2047. – Pp. 1-6. DOI:10.1088/1742-6596/450/1/012047.

14.Руководство пользователя Fisher F5 / Офіційні металошукачі України. – Режим доступу: <https://klad.com.ua/wp-content/uploads/2020/02/f5.pdf>.

15.K“ubbeler, Karl-Heinz, Tester ERE s AVR mikrokontrollerom i minimumom dopolnitelnykh elementov / Karl-Heinz K“ubbeler. – Accessed mode: <https://www.nikom.biz/pdf/A438001.pdf>.

References

1. Syguta, A., Krasnozhon, O. (2024). Doslidzhennia metodiv poshuku vybukhonebezpechnykh predmetiv [Research of methods of searching for explosive objects]. *Tekhnichni nauky i tekhnolohii: naukovyi zhurnal – Technical sciences and technologies*, 1(35), 156-169.

2. Guo, Q., Zhou, S., Zhang, X., Sun, C., Li, G. (2021). A Multiarray Electromagnetic Instrument for Shallow Surface Real-Time Detection. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 70, 1-9.

3. Ambruš, D., Vasić, D. and Bilas, V. A. (2020). Portable Planar Coil Array for Frequency-Domain Inductive Sensing of Metallic Objects. *2020 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*. Dubrovnik, Croatia. (pp. 1-5). doi: 10.1109/I2MTC43012.2020.9128673.

4. Tsumbal, O.V. Metal Discrimination in Metal Detector. *Electronic and Acoustic Engineering*, 2(4), 22–27. <https://doi.org/10.20535/2617-0965.2019.2.4.163837>.

5. Neyman, L.R., Kalantarov, P.L. (1959). Theoretical foundations of electrical engineering. Part 3. Theory of the electromagnetic field. (5-th ed.). Moscow-Leningrad: Gosehnergoizdat.

6. Bessonov, L.A. (1978). Theoretical foundations of electrical engineering: Electromagnetic field. Textbook for university students. (7th ed.). Vyissha shkola.

7. Introduction to COMSOL Multiphysics. (n.d.). cdn.comsol.com. Retrived from <https://cdn.comsol.com/doc/5.5/IntroductionToCOMSOLMultiphysics.pdf>.

8. Dymerecs, A.V., Krasnozhon, A.V., Krasnozhon, O.V. (2020). Simulation of a Grid Multi-Layer Shield to Reduce the Magnetic Field of Power Lines. *Microsystems, Electronics and Acoustics*, 25(3), 5-10.

9. Guelle, D., Smith, A., Lewis, A., Bloodworth, T. (2003). Metal detector handbook for humanitarian demining. Norwich: Office for Official Publications of the European Communities.

10.Ambruš, D., Vasić, D., Bilas, V. (2019). Comparative Study of Planar Coil EMI Sensors for Inversion-Based Detection of Buried Objects. *IEEE Sensors J.*, 1-12.

11.Scott, W. R. (2017). Array of broadband electromagnetic induction sensors for detecting buried objects. Proceedings of SPIE 10182, Detection and Sensing of Mines, Explosive Objects, and Obscured Targets XXII, 1018214 (3 May 2017). <https://doi.org/10.1117/12.2262944>.

12.Scott, W. R. (2008). Broadband Array of Electromagnetic Induction Sensors for Detecting Buried Landmines, *IGARSS 2008 - 2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. (pp. II-375-II-378). Boston, MA.

13.Ambruš, D., Vasić, D., Bilas, V. (2013). Active induction balance method for metal detector sensing head utilizing transmitter-bucking and dual current source. *J. Phys.: Conf. Ser.* 450 012047, 1-6.

14.Posibnyk korystuvacha [User’s manual]. (2020). *klad.com.ua*. <https://klad.com.ua/wp-content/uploads/2020/02/f5.pdf>.

15.Bazykin, S. (2017). Tester ERE s AVR mikrokontrollerom i minimumom dopolnitelnykh elementov. [DER tester with AVR microcontroller and minimum additional elements]. <https://www.nikom.biz/pdf/A438001.pdf>.

Отримано 02.12.24

Krasnozhon Oleksii¹, Krasnozhon Andrii², Dymerecs Andrii³, Syguta Artem⁴

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Information and Computer Systems
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: wingcommander2011@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2500-254X>

Scopus Author ID: 57190377188

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of electrical engineering and information
and measurement technologies
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: red_john@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-6215-7535> **Scopus Author ID:** 57191825825

³PhD student of the Department of Electronics, Automatics, Robotics, Mechatronics, group ASD-122-22
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: andrey.dymerecs@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7617-5291> **Scopus Author ID:** 57204287360

⁴PhD student of the Department of Information and Computer Systems, group ASD-122-22
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: syguta@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0009-8328-1277>

**COMPUTER MODEL FOR DETECTING THE METAL OBJECTS
WITH INDUCTION METAL DETECTOR**

The relevance of the article is to highlight the process of creating a computer model of metal object detection in the COMSOL Multiphysics environment and the results of its application. Its use will increase the efficiency of the use of induction metal detectors, which is extremely important under war conditions, as it will allow better and faster detection of metal explosive objects.

One of the most common in terms of price/quality ratio for detecting metal objects is the single-circuit resonant inductive metal detector, which has certain structural features. The ability to detect metal objects is provided by a system of induction coils, the most common of which is the Double D type system. The problem of calculating the induction of the magnetic field generated by a coil in any region (set of points) of space is therefore very complex and difficult to solve mathematically. Moreover, its complexity is directly proportional to the number of these points.

The purpose of the article is to develop a computer model for the detection of metal objects for an inductive metal detector with a double D-coil system, to configure its parameters using the example of a real Fischer F5 metal detector; to analyse the results of the application with the determination of the possible directions of use of the created model, as well as the features and limitations of its application.

The article presents the results of creating a three-dimensional model of the metal object detection system, describes its main parameters, and lists the interfaces and tools used in the COMSOL environment. Graphs and colour maps show the dependence of the voltage induced in the receiver coil and the phase difference between the currents of the two coils on the position of a cylindrical metal target as it moves in the horizontal and vertical planes, as its geometric dimensions change and as its specific electrical conductivity changes (corresponding to the change in metal). The limits of the geometric dimensions and the distance of the target from the system where detection becomes unlikely are determined.

The conclusions emphasise the significance of the results obtained, as well as possible directions for the application of the developed model and the benefits of its use.

Key words: computer model; metal detector; inductance; coil system; COMSOL Multiphysics; magnetic field; double D; object radius.

Fig.: 8. References: 15.