

ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕНЕРГЕТИКА

DOI 10.31891/2307-5732-2021-297-3-101-Помилка! Закладку не визначено.
УДК 621.373.52:539.1.078

О.В. МОЙСЮК, А.П. САМІЛА

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича
ORCID ID: 0000-0001-8279-9116
e-mail: a.samila@chnu.edu.ua

**ДОСЛІДЖЕННЯ ТОПОЛОГІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ
СПІРАЛЕПОДІБНОЇ КОТУШКИ ЯКР-ДЕТЕКТОРА ВИБУХОВИХ ТА
НАРКОТИЧНИХ РЕЧОВИН**

Перспективним методом для виявлення переважної більшості вибухових та наркотичних речовин, які у своєму складі містять атоми азоту (^{14}N) або хлору (^{35}Cl , ^{37}Cl), є метод ядерного квадрупольного резонансу. В роботі наведено результати досліджень топології напруженості електромагнітного поля спіралеподібної котушки, призначеної для використання у якості передавально-приймальної антени портативного детектора вибухонебезпечних предметів та наркотичних речовин, принцип дії якого ґрунтується на реєстрації сигналів ізотопу ^{14}N методом ядерного квадрупольного резонансу. З метою визначення топології електромагнітного поля створено розрахункову область, що являється моделлю фізичної конструкції спіралеподібної котушки. Методом кінцевих елементів проведено числове моделювання у середовищі COMSOL Multiphysics. Моделювання проводилось на частоті 3,4 МГц, що наближається до значення частоти виявлення сигналу спаду вільної індукції від нітриту натрію 3,41 МГц. Найкращі результати показала модель котушки з п'ятьма витками, внутрішнім радіусом 25 мм, зовнішнім радіусом 225 мм.

Ключові слова: ядерний квадрупольний резонанс, спіралеподібна котушка, топологія електромагнітного поля, моделювання.

OLEKSANDR V. MOISIUK, ANDRII. P. SAMILA
Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University

**INVESTIGATION ABOUT ELECTROMAGNETIC FIELD TOPOLOGY OF THE SPIRAL COIL FOR NQR
DETECTOR OF EXPLOSIVE AND NARCOTIC SUBSTANCES**

Given the increased likelihood of dangerous situations in Ukraine and abroad related to the intensification and scale of terrorist acts, it is important not only to quickly locate and eliminate the terrible consequences, but also to prevent, including prevent destabilizing factors. That is why remote detection of explosives and drugs is relevant and promising in the direction of strengthening the fight against terrorism and increasing national security.

A promising method for detecting the vast majority of explosives and narcotics that contain nitrogen (^{14}N) or chlorine atoms (^{35}Cl , ^{37}Cl) is the nuclear quadrupole resonance method. In the presence of a gradient of high-frequency field strength inside the sample in the process of forming the response signal is "blurring" the vector of the total spin magnetization, which leads to the expansion of the resonant signal and reduce its amplitude. Increasing the homogeneity of the high-frequency field is especially important for the detection of weak signals observed in the study of substances with a low natural prevalence of magnetoactive nuclei.

The paper presents the results of research on the topology of the electromagnetic field strength of a helical coil designed for use as a transmitting and receiving antenna of a portable detector of explosives and drugs, the principle of which is based on the registration of ^{14}N isotope signals by nuclear quadrupole resonance. To determine the topology of the electromagnetic field, a computational domain was created, which is a model of the physical structure of the spiral coil. The finite element method performed numerical simulations in COMSOL Multiphysics. The simulation was performed at a frequency of 3.4 MHz, which is close to the value of the detection frequency of the attenuation signal of free induction from sodium nitrite 3.41 MHz. The best results were shown by the model of the coil with five turns, internal radius of 25 mm, external radius of 225 mm. The obtained magnetic field diagrams indicate better resistance to radio frequency interference when working in a real experiment. Based on the data obtained during the simulation, a multilayer (Multislice) model of the electric field and the isosurface of the electromagnetic field of the studied model were created, which demonstrate the dynamics and density of the electromagnetic field around the coil. From the obtained graphical dependences it is possible to draw a conclusion about the normalized attenuation of the intensity of electric field radiation from the geometric center of the coil, which, in turn, makes it clear exactly how to place the sample.

Keywords: nuclear quadrupole resonance, spiral coil, topology of the spiral coil, simulation.

Постановка задачі дослідження

В умовах підвищеної ймовірності виникнення небезпечних ситуацій в Україні та за її межами, пов'язаних з активізацією та розмахом терористичних актів, важливим є не лише швидка локалізація та ліквідація жакливих наслідків, але й запобігання, зокрема попередження дестабілізуючих факторів. Саме тому, актуальним і перспективним у напрямі посилення боротьби з тероризмом та підвищення національної безпеки є дистанційне виявлення вибухонебезпечних предметів та наркотичних речовин.

Незважаючи на інтенсивний розвиток науки і техніки, на даний час основними пристроями для виявлення вибухонебезпечних предметів все ще є електромагнітні металошукачі, перші прототипи яких використовувались ще під час Другої світової війни. Металошукачі даного типу мають ряд недоліків. Через те, що електромагнітний сигнал відбитий від протипіхотної міни набагато слабший, оператор повинен підвищувати чутливість детектора. Однак, при більш високій чутливості набагато більше інших металевих об'єктів, таких як цвяхи та уламки корпусів, створюють перешкоди для детектора. Оператор змушений

працювати при дуже високій чутливості та позначати будь-яку тривогу, як потенційну міну. На жаль, наступний крок є найскладнішим – потрібно відокремити наземні міни від “помилкових тривог”. В даний час це визначення “помилкових тривог” все ще робиться за допомогою механічного зондування. Сапер виконує дуже делікатне вилучення із загофреною паличкою для класифікації джерела відбитого сигналу: наземна міна, фальсифікація або просто іржавий цвях. У цьому сенсі пошук мін достатньо легкий, однак, відокремлення їх від інших предметів є важким і надзвичайно небезпечним [1]. Іншим суттєвим недоліком електромагнітних металошукачів є неможливість виявлення вибухонебезпечних предметів у неметалевих контейнерах (ручні поклажі, конверти, пластикові контейнери та інше) [2].

Альтернативним методом виявлення вибухових речовин є застосування високочутливих парових детекторів. Проте, випаровування вибухових речовин, що використовуються у наземних мінах досить низьке. Також сучасні міни виготовляють з герметично запечатаною вибуховою речовиною в полімерному корпусі. Пари і частинки вибухових речовин досить липкі, тому просочування вибухової речовини через корпус а потім через землю відбувається повільно і неефективно. Проведені дослідження свідчать про те, що в польових умовах навіть високочутливі парові детектори можуть не виявити шлейф випаровування від мін [3].

Перспективним методом для виявлення переважної більшості вибухових та наркотичних речовин, які у своєму складі містять атоми азоту (^{14}N) або хлору (^{35}Cl , ^{37}Cl), є метод ядерного квадрупольного резонансу (ЯКР) [2, 4]. На основі проведеного аналізу та з врахуванням явних переваг методу (неруйнівний вплив, можливість дослідження неоднорідних сумішей, експрес-аналіз без попередньої підготовки зразків) встановлено, що розроблення апаратно-програмних засобів виявлення небезпечних речовин на основі ЯКР є більш доцільним порівняно з іншими методами.

Метою даної роботи є розроблення моделі прийнятно-передавальної антени ЯКР-детектора для виявлення протипіхотних і протиавтомобільних мін в умовах розмінування та дослідження топології електромагнітного поля в її робочій зоні.

Модель спіралеподібної котушки в середовищі Comsol Multiphysics

Антенна ЯКР-детектора представляє собою спіральну радіочастотну котушку, яка працює в ближньому полі [5]. З метою адаптації до функціональних вимог розмінування, розмір котушки вибрано пропорційним розміру протиавтомобільних мін, з чого слідує, що діаметр котушки становить приблизно 400 мм. Крім того, котушку пропонується виготовити з доступної мідної трубки із зовнішнім діаметром 8 мм та товщиною 2 мм, що забезпечує малу вагу та низьку вартість, а також спрощує процес виготовлення котушки.

Для моделювання та обробки результатів числової моделі були застосовані комп'ютерні програми, які працюють на методах скінченних елементів [6]. Широке застосування просторового моделювання зумовлене складністю формулювання задачі та відсутністю теоретичного обґрунтування розрахунку електричного та магнітного полів, особливо в випадках, коли задачі виходять за рамки класичної теорії електромагнітного поля. В першу чергу це стосується постановки задач розрахунку електромагнітного поля щодо векторних магнітних та скалярних електричних потенціалів [7]. Топологія електричного поля спіралеподібної котушки була проаналізована в середовищі COMSOL Multiphysics, яке пропонує широкі можливості в галузі моделювання електромагнітного, теплового, механічного, акустичного та інших полів [8].

Запропонована геометрична модель спіралеподібної котушки зображена на рис. 1. На торцях котушки з'єднана з прямокутними поверхнями, які являють собою контактні клеми. Два прямокутники, які вступають в ролі затискачів представляють паралельну конфігурацію порту збудження та конденсатора паралельного коливального контуру вхідного кола ЯКР-детектора (рис. 1,а). Котушка геометрично являє собою спіраль із заданими внутрішнім і зовнішнім радіусами, з нульовим осьовим кроком та п'ятьма витками. Також геометрія котушки може бути представлена кривою Безье з відносним допуском 1E-5.

З метою імітації ідеальних умов поглинання енергії електромагнітного випромінювання та унеможливлення помилкових відбиттів, геометрична модель котушки інкапсульована повітряною кулею радіусом 1000 мм і перерізом шару 100 мм, визначеною як ідеально узгоджений шар (PML) (рис. 1,б).

Для чисельного моделювання використано високочастотний модуль програмного середовища. Зокрема, для обчислення реакції моделі, яка піддається гармонічному збудженню, використовується дослідження частотної області та адаптивна частотна розгортка для більш точної роздільної здатності за частотою. Хвильове рівняння (1) описує область повітряної сфери PML та область товщини мідної трубки. Доменом порожнистої трубки, яка насправді містить повітря, можна знехтувати, оскільки він відіграє мінімальне значення при розрахунку розподілу електромагнітного поля за межами зони виявлення. Таким чином, вимоги до обчислювальних ресурсів суттєво зменшуються.

$$\nabla \times \mu_r^{-1} (\nabla \times E) - k_0^2 \left(E_r - \frac{J_r^\sigma}{\omega E_0} \right) E = 0. \quad (1)$$

Для представлення контактних клем котушки додаються металеві провідники без втрат, що з'єднують порт збудження з торцевими клемами котушки, використовуючи граничну умову (2) ідеального електричного провідника (ПЕС)

$$n \times E = 0. \quad (2)$$

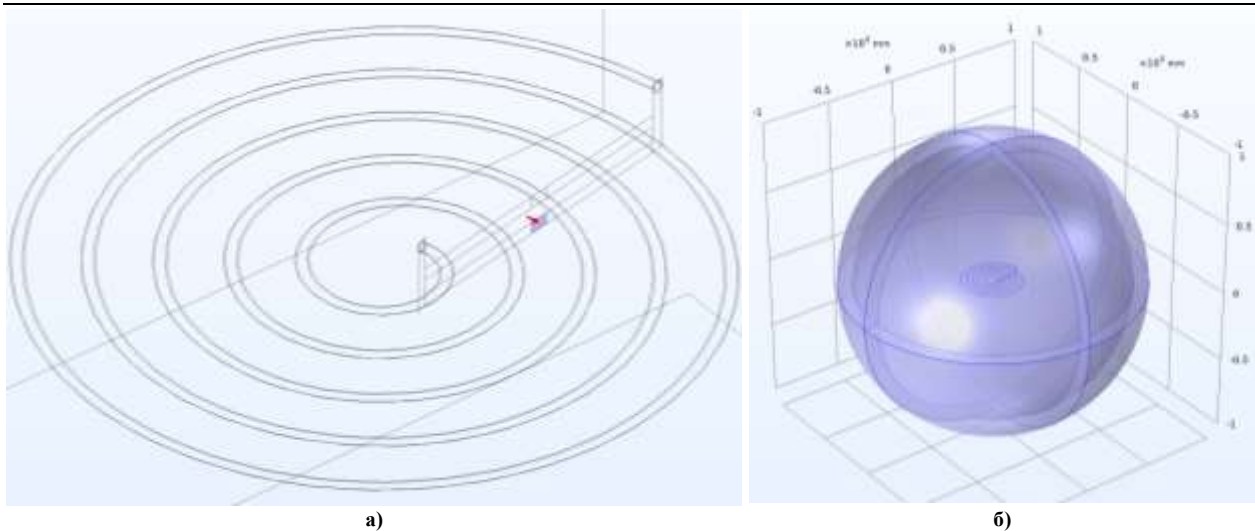


Рис. 1. Геометрична модель спіралеподібної котушки: а) загальний вигляд з торцевими клемами, портом збудження та відповідним конденсатором; б) котушка інкапсульована повітряною кулею радіусом 1000 мм і PML шаром 100 мм

Для гармонійного збудження котушки, на перетині металевих клем котушок (PEC) із характерним імпедансом 50 Ом визначається рівномірний порт із зосередженими параметрами. Для зосередженого елемента та порта вводимо рівняння закону Ома (3)

$$Z = \frac{V_1}{I_1} \quad (3)$$

Для гармонійного збудження котушки Lumped Port розміщується між клемами котушок з характеристичним опором 50 Ом. Його клеми слугують для формування лінії передавання модульованого Гаусового імпульсу різної частоти. Центральна частота на якій проводились моделювання становить 3,4 МГц, що наближається до значення частоти виявлення нітриту натрію 3,41 МГц. Незначна різниця частот 0,01 МГц не становить проблем для аналізу результатів моделювання, оскільки є не значною щодо характеристик випромінювання при порівняльному оцінюванні котушок з різною геометрією. Отже, для того, щоб дослідити імпеданс на частоті 3,4 МГц емісійний Lumped Element додається паралельно Lumped Port на перетині меж Perfect Electric Conductor.

На попередньому етапі до моделювання остаточної геометричної моделі, створення та розрахунку електромагнітних параметрів було проведено попередній аналіз чутливості сітки. Параметри сітки повинні бути такими, які б забезпечували компроміс між часом моделювання та точністю результатів. З цією метою був визначений глобальний параметр сітки (h1), який би дробово розподілявся по всіх доменах та межах створеної моделі. Також параметр (h1) повинен бути сумісним розмірами остаточної параметризованої моделі: спіральна котушка з п'ятьма витками, внутрішній радіус (tr) 25 мм, зовнішній радіус (br) 225 мм і повітряна куля радіусом 1000 мм із шаром PML 100 мм. Також було розраховано ємність конденсатора коливального контуру, яка складає 394 пФ. Для того, щоб оцінити остаточне значення (h1) та отримання оптимальних параметрів сітки було розпочато параметричне дослідження частотного домену щодо розміру сегментів сітки, точністю та часом моделювання для параметризованих значень в діапазоні від 15 мм з розміром кроку 0,1 мм. Було встановлено, що максимальними значеннями, які не могли б суттєво погіршити отримані дані, є: максимальний розмір елемента 200 мм, мінімальний розмір елемента 4 мм, максимальний крок приросту розміру елемента 1,5 мм, коефіцієнт кривизни 0,6 і роздільна здатність вузьких областей 0,5. Наведені значення повинні бути підібрані окремо для кожної геометричної форми для підвищення ефективності моделювання та запобігання перетину елементів сітки в місцях викривлення геометрії моделі.

Сказане вище особливо актуальне у випадку імпорту геометричної моделі з інших програмних засобів. Для імпортованих моделей найкращим рішенням буде застосування булевих операцій поєднання та різниці.

Зовнішній вигляд параметричної сітки накладеної на геометрію спіралеподібної котушки зображено на (рис. 2,а) та збільшений вигляд сітки на (рис. 2,б).

Аналіз результатів

Оброблення результатів здійснено вбудованими засобами COMSOL з допомогою об'єктів і опцій пункту «Results». В цьому пункті автоматично створюються файли результатів моделювання, які надалі будуть використані, як об'єкти необхідні для графічного представлення результатів після завершення розрахунку. У вікні «Graphics» графічно відображаються представлені результати чисельного моделювання. Параметри відображення задаються окремо для кожного графічного результату, і в основному залежать від побажань користувача.

Для того, щоб знайти резонансні режими для різних геометрій котушок дослідження частотної області було розпочато з кроком 1 МГц. Для знайдених режимів проводилось повторне дослідження частотної області з кроком 0,1 МГц. Найкращу геометрію котушки та більш точні резонансні режими було знайдено із застосуванням адаптивних частотних розмахів з кроком 0,01 МГц. Досліджувані моделі було

адаптовано до частотної області 3,4 МГц (що є відповідною частотною областю, що представляє інтерес для виявлення ЯКР) за допомогою ємнісного Lumped Element, розміщеного паралельно щодо Lumped Port.

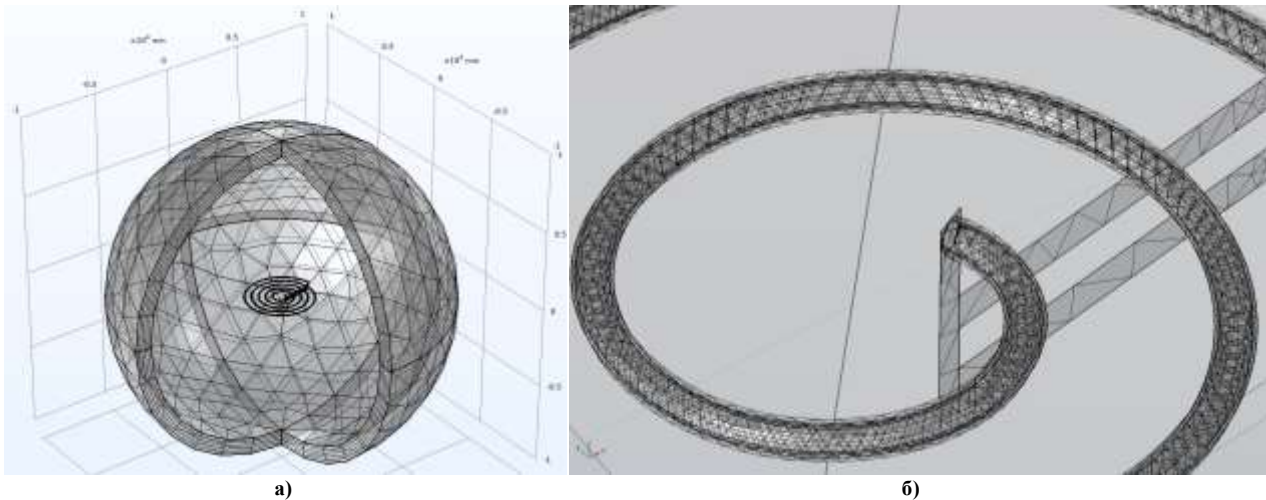


Рис. 2. Сітка кінцевих елементів отримана унаслідок триангуляції розрахункової області: а) загальний вид; б) деталізоване представлення фрагменту котушки

З отриманих під час моделювання даних було створено багатопланову (Multislice) модель електричного поля (рис. 3) та ізоповерхні електромагнітного поля (рис. 4) досліджуваної моделі. Ізоповерхні зазвичай відображаються за допомогою комп'ютерної графіки і використовуються як методи візуалізації даних при обчислювальній динаміці рідин та полів, що дозволяє інженерам вивчати особливості потоку поля навколо об'єктів, таких як антени. Ізоповерхні, як правило, є популярною формою візуалізації для об'ємних наборів даних, оскільки, їх можна відтворити за допомогою простої полігональної моделі, яку можна дуже швидко відобразити графічно на екрані.

Наведені зображення демонструють динаміку та щільність електромагнітного поля навколо котушки. Пучність довкола Lumped port (порт живлення) та Lumped element (ємнісний елемент) зумовлені їх близьким розташуванням відносно один одного та їхньою близькістю до котушки. В реальних умовах пучність не буде спостерігатись, внаслідок віддаленості котушки від обчислювального пристрою.

З усіх досліджених моделей найкращі параметри вибірковості, коефіцієнту напрямленої дії та діаграм напрямленості має геометрія котушки з параметрами внутрішнього радіусу 25 мм, зовнішнього радіусу 225 мм, зовнішнім діаметром трубки 8 мм і внутрішнім діаметром трубки 6 мм. Для параметричного моделювання котушки було підібрано конденсатор ємністю 394 пФ. Результати моделювання частотної залежності імпедансу порту наведені на рис. 5.

В процесі моделювання також були отримані графіки інтенсивності випромінювання електромагнітного поля в робочій зоні котушки на відстанях 40 мм (рис. 6) та 100 мм (рис. 7).

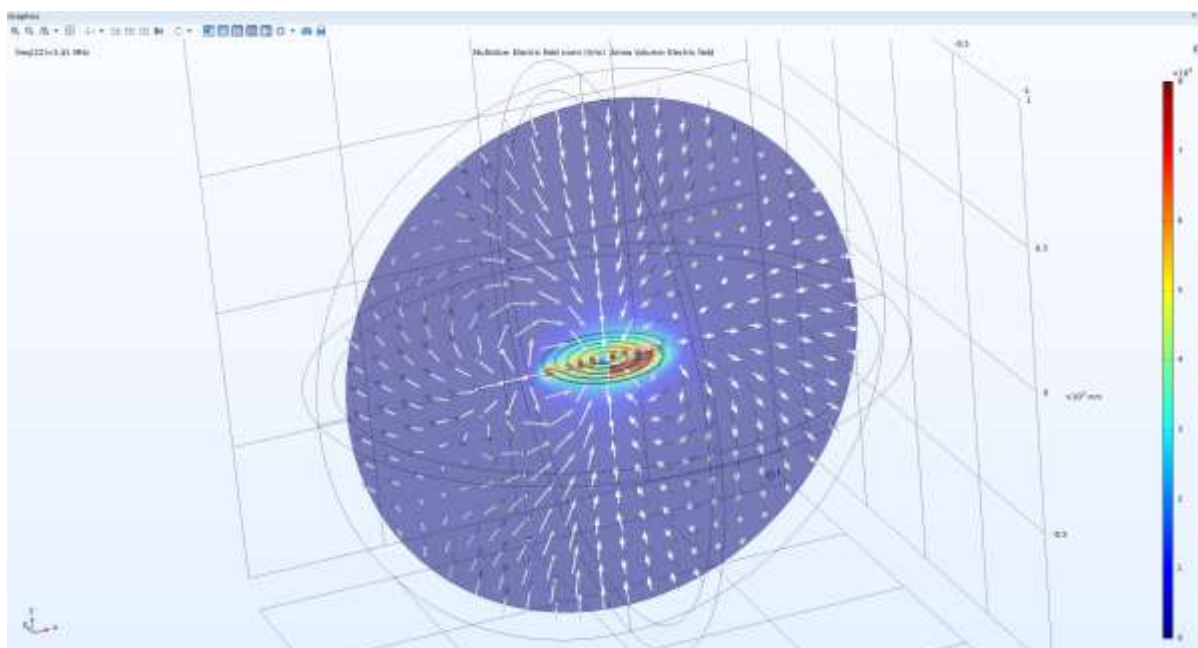


Рис. 3. Multislice модель електричного поля в COMSOL Multiphysics

З наведених графіків можна зробити висновок про нормалізоване затухання інтенсивності випромінювання електричного поля від геометричного центру котушки, що своєю чергою дає зрозуміти, як саме необхідно розмістити досліджуваний зразок [9].

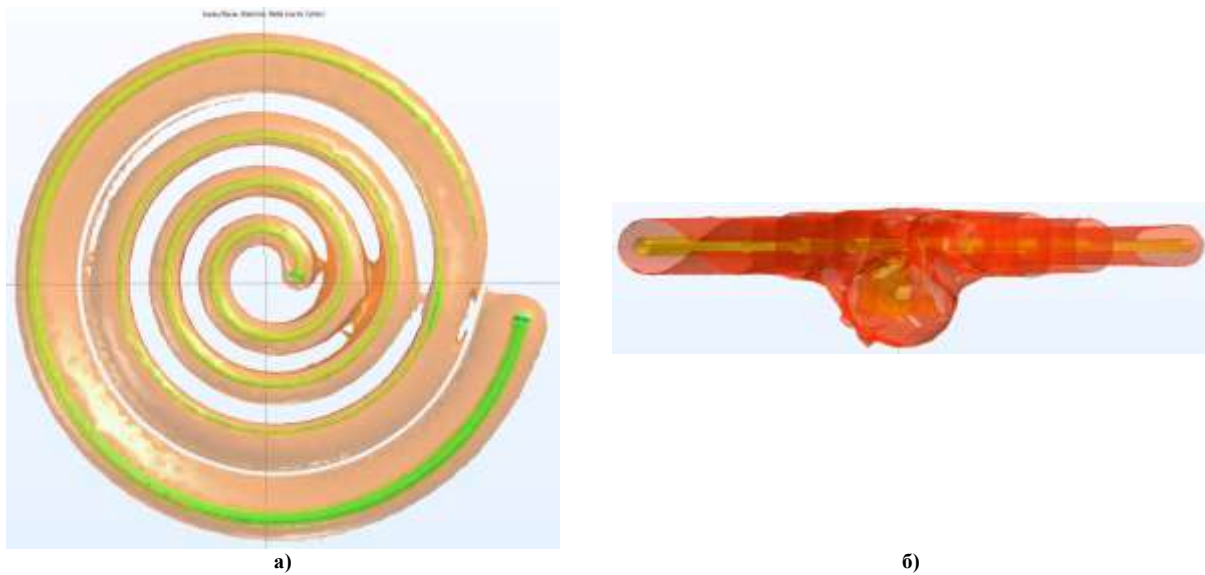


Рис. 4. Ізоповірня електромагнітного поля досліджуваної моделі: а) вигляд зверху; б) вигляд збоку

Не зважаючи на те, що спроектована котушка виконує функції передавально-приймальної антени, при моделюванні вона налаштовувалась лише в режимі передавання. Обґрунтування цього підходу полягає у використанні “теорема взаємності”. Практично, вклад у отриманий сигнал відгуку від речовини-зразка пропорційний імпульсу збудження в такому ж положенні, як і у випадку роботи даної котушки в режимі передавання [10].

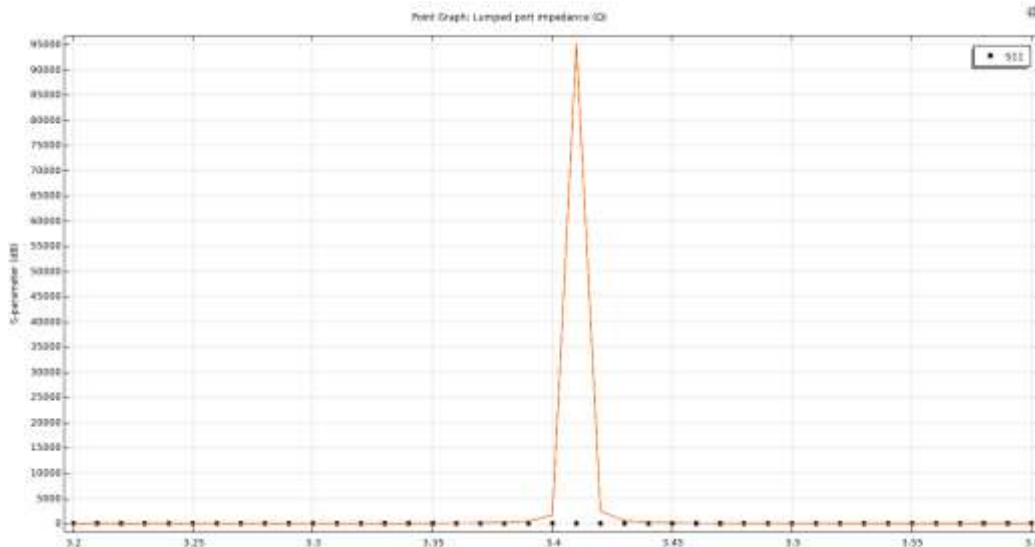


Рис. 5. Частотна залежність імпедансу порту при ємності конденсатора 394 пФ

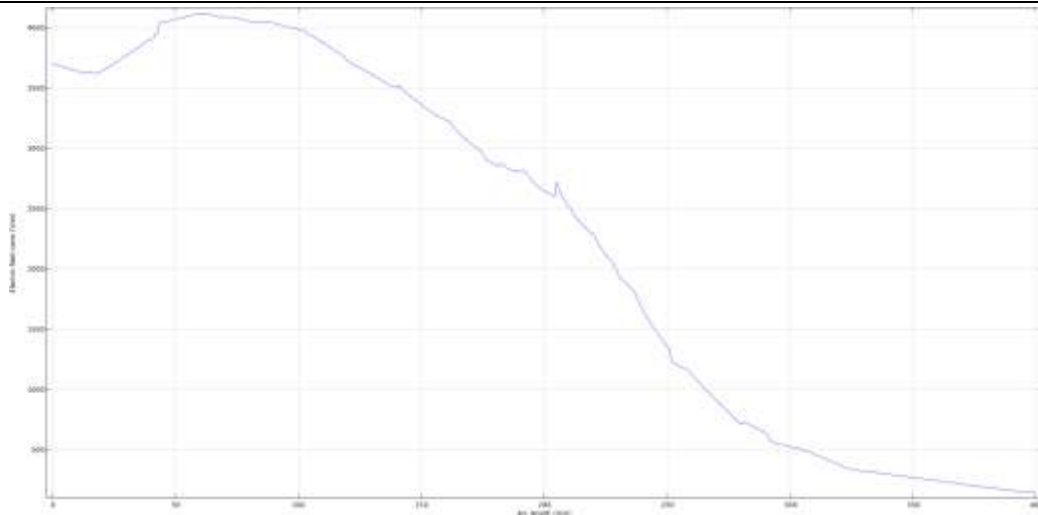


Рис. 6. Графік інтенсивності випромінювання електричного поля від центру котушки. На відстані від котушки 40 мм та частоті 3,41 МГц

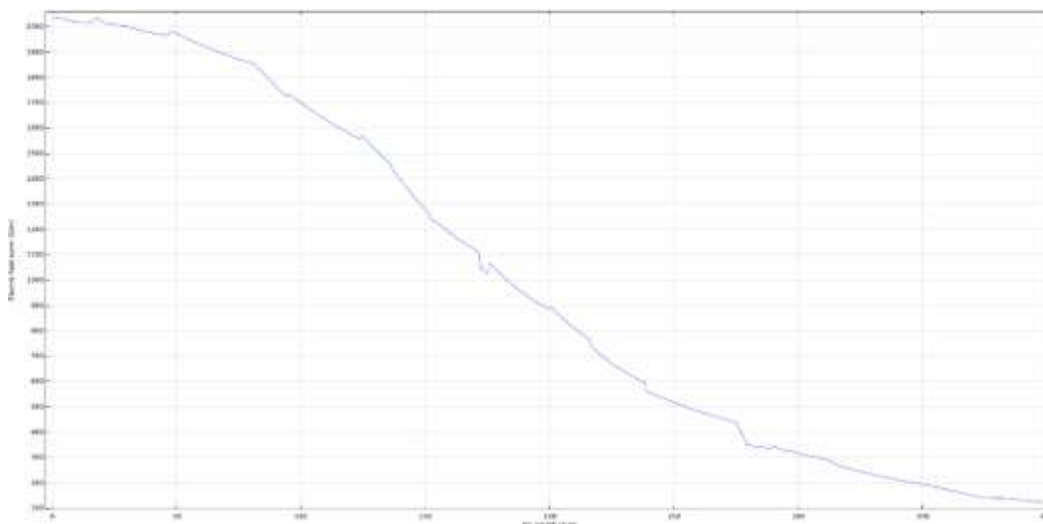


Рис. 7. Графік інтенсивності випромінювання електричного поля від центру котушки. На відстані від котушки 100 мм та частоті 3,41 МГц

Висновки

У даній роботі представлено концептуальні етапи електромагнітного моделювання спіральної радіочастотної передавально-приймальної котушки ЯКР-детектора для виявлення вибухонебезпечних та наркотичних матеріалів.

Найкращі результати показала модель котушки з п'ятьма витками, внутрішнім радіусом (tr) 25 мм, зовнішнім радіусом (br) 225 мм. Отримані діаграми магнітного поля свідчать про кращу стійкість до радіочастотних перешкод при експлуатації в умовах реального експерименту. Хоча вищий коефіцієнт напрямленої дії начебто виглядав би вигіднішим для такої конструкції котушки, але в той же час її сприйнятливість до джерел шуму зростає рівнозначно, що призвело б до погіршення експлуатаційних характеристик.

Модель (tr)25(br)225 демонструє узгодженість відносних залежностей згасання інтенсивності випромінювання електричного поля, отриманих за допомогою чисельного моделювання.

Література

1. Russell L., "Detection of Land Mines (Part I)," Canadian Army Journal, No. 1, November 1947.
2. Apih T., Rameev B., Mozzhukhin G., Barras J. (Eds.) Magnetic Resonance Detection of Explosives and Illicit Materials. NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics – Springer, 2014. 168 p.
3. Gasser R. and Thomas T., "Prodding to Detect Mines: A Technique with a Future," in 2nd IEE International Conference on Detection of Abandoned Landmines, Edinburgh, United Kingdom, October 1998.
4. Samila A., Haliuk S., Krulikovskyi O. Structural and functional synthesis of the radioelectronic means of a pulsed NQR. "Development and application systems" The 15th International Conference DAS 2020, Romania, Suceava, may 21–23 2020. Suceava, 2020, P. 112–116.
5. Браїловський В.В. Оптимізація топології напруженості височастотного поля давача радіоспектрометра / В.В. Браїловський, А.П. Саміла, О.Г. Хандожко // Вісник національного університету

«Львівська політехніка». – 2009. – № 646. – С. 46–51.

6. Samila A. Simulation of magnetic field topology in a saddle-shaped coil of nuclear quadrupole resonance spectrometer, Progress In Electromagnetics Research Letters, 2015, Vol. 56, P. 83–88.

7. Glukhenkiy O.I., Goryslavets Yu.M., Tokarevskiy A.V. Three-dimensional simulation of single-phase electromagnetic stirrer of liquid metal. Technical Electrodynamics. 2013. No. 5. P. 77–84.

8. Understand, Predict, and Optimize Engineering Designs with the COMSOL Multiphysics® Software COMSOL Multiphysics®. 2017. URL: <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics>.

9. Расчет и проектирование магнитных систем : учебное пособие [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа : http://open.ifmo.ru/images/b/b6/144261_book.pdf.

10. Fukushima E., Roeder S.B.W., Experimental Pulse NMR: A nuts and bolts approach, Addison-Wesley, 1981.

References

1. Russell L., "Detection of Land Mines (Part I)," Canadian Army Journal, No. 1, November 1947.

2. Apih T., Rameev B., Mozhukhin G., Barras J. (Eds.) Magnetic Resonance Detection of Explosives and Illicit Materials. NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics – Springer, 2014. 168 p.

3. Gasser R. and Thomas T., "Prodding to Detect Mines: A Technique with a Future," in 2nd IEE International Conference on Detection of Abandoned Landmines, Edinburgh, United Kingdom, October 1998.

4. Samila A., Haliuk S., Krulikovskiy O. Structural and functional synthesis of the radioelectronic means of a pulsed NQR. "Development and application systems" The 15th International Conference DAS 2020, Romania, Suceava, may 21–23 2020. Suceava, 2020, P. 112–116.

5. Brailovskiy V.V. Optymizatsiia topolohii napruzhnosti vysokochastotnoho polia davacha radiospektrometra / V.V. Brailovskiy, A.P. Samila, O.H. Khandozhko // Visnyk natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnik». – 2009. – № 646. – С. 46–51.

6. Samila A. Simulation of magnetic field topology in a saddle-shaped coil of nuclear quadrupole resonance spectrometer, Progress In Electromagnetics Research Letters, 2015, Vol. 56, P. 83–88.

7. Glukhenkiy O.I., Goryslavets Yu.M., Tokarevskiy A.V. Three-dimensional simulation of single-phase electromagnetic stirrer of liquid metal. Technical Electrodynamics. 2013. No. 5. P. 77–84.

8. Understand, Predict, and Optimize Engineering Designs with the COMSOL Multiphysics® Software COMSOL Multiphysics®. 2017. URL: <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics>.

9. Raschet i proektirovanie magnitnyh sistem : uchebnoe posobie [Elektronnij resurs]. – 2017. – Rezhim dostupu : http://open.ifmo.ru/images/b/b6/144261_book.pdf.

10. Fukushima E., Roeder S.B.W., Experimental Pulse NMR: A nuts and bolts approach, Addison-Wesley, 1981.