

# РОЗРОБКА АРХІТЕКТУРИ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ПОЛІВ ТОНКОСТІННИХ КОНСТРУКЦІЙ В ТРИВИМІРНОМУ ПРОСТОРІ

УДК 004.942: 621.3.013

## РЯБЕНЬКИЙ В.М.

д.т.н., професор кафедри теоретичної електротехніки та електронних систем, Національного Університету Кораблебудування ім. адмірала Макарова, Україна, м. Миколаїв, optron2@gmail.com

## ЧУДАЙКІН І.І.

канд. техн. наук, доцент кафедри теоретичної електротехніки та електронних систем, Національного Університету Кораблебудування ім. адмірала Макарова, Україна, м. Миколаїв, igorlu3141509@rambler.ru

## ТАРГУНАКОВА Ю. Д.

магістр, аспірант кафедри теоретичної електротехніки та електронних систем, Національного Університету Кораблебудування ім. адмірала Макарова, Україна, м. Миколаїв, golubkajulya@gmail.com

### ВСТУП

На сучасному етапі дослідження у Світовому океані й континентальному шельфі вимагають переобладнання технологічного забезпечення морських розвідницьких робіт для дослідження морського дна на наявність корисних копалин, предметів археології, об'єктів, що затонули і т.д.

Пошук об'єкта, що підлягає підйому, входить у розряд умовно-коректно поставлених задач. Вибір технічних засобів для кожного етапу роботи: пошук, розвідка, оцінка потужності шарів (при пошуку корисних копалин) здійснюється, виходячи з вимог до геологічного матеріалу на кожному етапі й, як правило, містить у собі різні засоби зйомки, пробного відбору й спостережень за допомогою підводних апаратів. Підводні апарати звичайно здійснюють пошук візуально та за допомогою гідролокаторів і радіолокаторів.

Найчастіше використовуються й більш розвинені гідроакустичні навігаційні системи. Класичні гідроакустичні системи поділяються на декілька типів: з довгою базою (LBL), короткою базою (SBL) та ультракороткою базою (USBL). Методики їх застосування не завжди

відповідають постійно зростаючим вимогам, а саме: дальності дії, точності, економічності та ефективності. Для утримання судна на профілі й позиціонування в заданому місці, забезпечуючи задану необхідну точність, впроваджуються системи керування рухом судна. Також потрібна розробка автоматизації таких систем, що забезпечують утримання судна на траєкторії, заданої відрізками прямих і кіл із допустимими радіусами.

Пошуки ускладнюються по причині поганій видимості в річках, у водоймах з мулистим дном. На певній глибині будь-якої акваторії настільки погана видимість, що розвідка проводиться фактично «наосліп». Водолazi, що проводять розвідку, змушені пересуватися по натягнутому тросу. Всі ці умови дуже погіршують результати дослідження.

Навіть при гарній видимості не легко переміщати мініатюрний апарат паралельними курсами, які частково перекривають один одного. Оскільки такі пошукові смуги так чи інакше досить вузькі, ніколи не можна бути впевненим, що якась ділянка дна не залишиться пропущеною (такі ділянки звичайно називають «канікулами»).

Усе, перераховане вище, нашоухує на думку переосмилення даної проблеми й спонукає на пошук принципово відмінного рішення. Таким рішенням є інтерпретація об'єктів за їх магнітними полями. В даний час, завдяки розвитку елементної бази електроніки, мікропроцесорної техніки й програмного забезпечення, з'являється можливість створення на якісно новому рівні вимірювальних цифрових магнітометричних комплексів із принципово новими характеристиками. Це дозволяє здійснювати діагностику й вимірювання магнітного поля (МП) у реальному масштабі часу з використанням сучасних цифрових методів обробки інформації.

Земля – магніт, отже, магнітне поле Землі намагнічує різні об'єкти, причому не тільки металеві, але й виготовлені з різних порід, які містять у собі певну кількість субстанції заліза, що дає можливість визначити їхнє місцезнаходження. Ці об'єкти створюють локальні неоднорідності, що формують аномальне магнітне поле Землі.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Отже, виникає необхідність дослідження й розробки структурно-алгоритмічних основ організації комп'ютеризованих інформаційно-вимірювальних систем моніторингу неоднорідностей магнітних полів водного середовища, що дозволяють моделювати основні імовірнісні характеристики знаходження затонулих об'єктів, на підставі яких розробляється стратегія проведення експериментальних досліджень.

Цей метод також надає непрямі можливості геологічного вивчення різних районів і різних геологічних епох шляхом дослідження магнітного поля Землі.

Ідентифікація затонулих об'єктів — це обернена задача морської магнітометрії, і вона належить до класу некоректно поставлених задач. Рішення оберненої задачі передбачає визначення форми і розташування тіл, їх густини та об'єму. Рішення цього складного завдання зазвичай наводиться в кілька етапів.

Першим етапом розв'язку такої задачі є рішення прямої задачі. Пряма задача полягає у визначенні аномального поля, створюваного тілами певної форми, густини за певних умов занурення і накопичення інформації про ці об'єкти. Особливий інтерес представляють задачі визначення аномального поля об'єктів, що складаються з тонкостінних конструкцій.

Тонкі пластини та оболонки використовуються в різних галузях сучасної техніки значно ширше, ніж суцільні тіла, тому розв'язок задач про намагнічення тонкостінних конструкцій має особливе значення.

Також варто відзначити, що зміна геомагнітного поля Землі впливає на біологічні об'єкти [1,2]. Джерелами зміни цього поля в місцях тривалого перебування людей є намагнічені феромагнітні елементи конструкцій будинків, а також різних технічних засобів. Для створення методів оцінки рівнів зниження геомагнітного поля в будинках необхідна методика розрахунку магнітного поля біля феромагнітних елементів будівельних конструкцій.

Задача про намагнічення тонких оболонок і пластин являє собою специфічний граничний випадок загальної магнітостатичної задачі, що заслуговує самостійного розгляду [3]. Особливості цієї задачі полягають у тому, що мала, в порівнянні з іншими геометричними розмірами, товщина оболонки обумовлює появу в рішенні задачі різниці близьких величин. Тому необхідно шукати такий шлях розв'язку завдання, при якому умова малості товщини враховувалося б вже в самому формуванні задачі. Для вирішення цієї задачі був розроблений модифікований метод граничних елементів (ММГЕ) [4] і програмний комплекс MBEM для чисельного розрахунку розподілу напруженості магнітного поля та потенціалу навколо й усередині тонкостінних конструкцій. Цей комплекс має дружній інтерфейс, працює на операційній системі Linux, з використанням gmsh [5] та api3d [6] генераторів, MBEM було написано за допомогою C та C++ мов програмування. Розроблений ММГЕ, заснований на застосуванні фундаментальних розв'язків, які визначаються простими аналітичними виразами — було розроблено аналітичні вирази для розв'язування задач тривимірного магнітного поля складної конфігурації на основі рівнянь для розв'язку задач плоскпаралельного магнітного поля [7]. Також слід зазначити, що розроблений ММГЕ, позбавлений недоліку класичного методу граничних елементів, а саме — для побудови класичних граничних елементів треба мати функцію Гріна для відповідної області, такі функції знайдені не для всіх можливих областей [8].

Програмний комплекс приймає вхідні параметри, які задає користувач. Сам користувач вибирає за допомогою яких сіткових генераторів gmsh чи api3d викона-

ти побудову поверхневої сітки та куди вивести результати розрахунку: візуалізувати результати програми за допомогою інтерфейсу Gmsh чи вивести їх в файл. Також розроблений комплекс програм дозволяє створити довільний об'єкт в інтерактивному режимі чи завантажити вже існуючий об'єкт; побудувати розрахункову сітку та вивести її на монітор (якщо сітка не підійшла, то можна з легкістю помінати вхідні параметри триангуляції та розрахувати нову сітку) [9]; після того, як була побудована сітка, розраховується потенціал простого

шару (ППШ) та виводиться результат розрахунку індукованого магнітного потенціалу та напруженості в вигляді графіків та векторів. Знаючи значення потенціалу простого шару, можна з легкістю знайти індуковане поле в будь-якій точці простору [10].

Розглянемо роботу програмного комплексу, коли користувач вибирає сітковий генератор gmsh. На рис. 1 представлено архітектуру розробленого програмного комплексу MBEM при виборі користувачем gmsh генератора:

### Архітектура програмного комплексу MBEM при виборі gmsh генератора

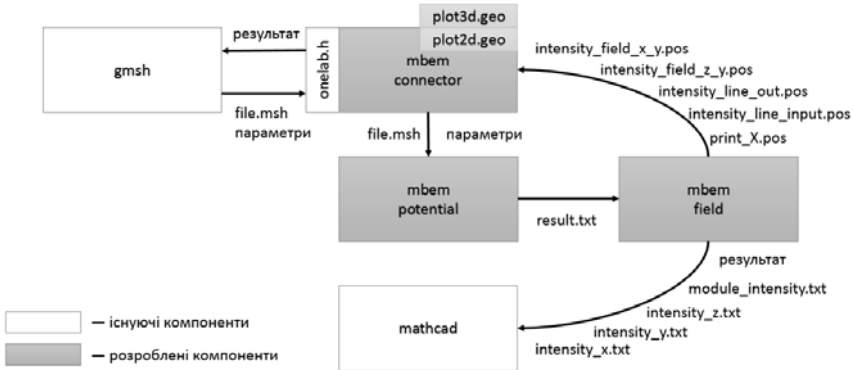


Рис. 1 Архітектура MBEM при виборі gmsh

Програма mbem connector координує роботу між усіма програмами, які входять в даний програмний комплекс. Після того, як була задана тонкостінна конструкція, користувач нажимає кнопку «Run», тоді інформація із даними про триангуляцію (кількість точок розбиття  $nV$ , їх координати, кількість трикутників та номери вершин, які входять в кожен трикутник (масив *faces* )) записуються у файл який має розширення «.msh». Програма mbem connector перевіряє цей файл на коректність та викликає програму mbem potencial. Ця програма розраховує потенціал простого шару тонкої оболонки та запише результат в файл result.txt. Після цього програма mbem connector викликає програму mbem field та передає їй файл result.txt. По розрахова-

нуму ППШ проводиться розрахунок індукованого магнітного потенціалу та напруженості в програмі mbem field. Програма mbem field формує файли із розрахованими значеннями вектору індукованої напруженості на площині під тонкостінною конструкцією (*intensity\_field\_x\_y.pos*) та на площині, що перетинає цю конструкцію посередині (*intensity\_field\_z\_y.pos*); із залежністю напруженості від відстані на відрізьку з координатами по осі абсцис  $-5 \leq x \leq 5$  метрів, який знаходиться під об'єктом ( $z = -2.m$ ) (*intensity\_line\_out.pos*) та на відрізьку з координатами  $x = 0, -5 \leq y \leq 5, -5 \leq z \leq 5$ , який перетинає об'єкт посередині (*intensity\_line\_input.pos*); із значенням ППШ та координатами тонкостінної конструкції

(print\_X.pos). Потім програма mbem connector відкриває за допомогою gmsh файли plot2d.geo та plot3d.geo, які обробляють та виводять на екран значення магнітного поля розрахованого, в mbem field. При необхідності, також можна вивести результат в Mathcad.

Розглянемо роботу MBEM при виборі користувачем ani3d генератора. На рис. 2 представлена архітектура розробленого програмного комплексу MBEM при виборі користувачем ani3d генератора:

## Архітектура програмного комплексу MBEM при виборі ani3d генератора

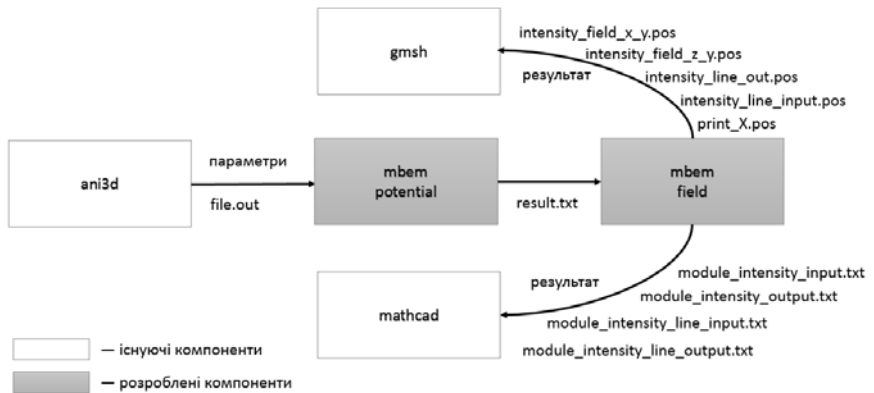


Рис. 2 Архітектура MBEM при виборі ani3d

За допомогою програми ani3d користувач створює довільний об'єкт чи завантажує вже існуючий об'єкт. Програма ani3d робить поверхневу триангуляцію об'єкта, якщо результат задовольняє користувача, то ani3d записує інформацію із даними про триангуляцію (кількість точок розбиття  $n^V$ , їх координати, кількість трикутників та номери вершин, які входять в кожен трикутник (масив *faces*)) у файл, який має розширення «.out». Після цього користувач запускає mbem potential. Ця програма розраховує ППШ тонкостінного об'єкта та записує результат в файл result.txt. Далі, програма mbem field проводить розрахунок індукованого магнітного потенціалу та вектору напруженості, та записує результат розрахунків в наступні файли: module\_intensity\_line\_output.txt (значення напруженості на відрізьку з координатами по осі абсцис  $-5 \leq x \leq 5$  метрів, який знаходиться під об'єктом ( $z = -2.м$ )); module\_intensity\_line\_input.txt (значення напруженості на відрізьку з координатами  $x = 0$ ,

$-5 \leq y \leq 5$ ,  $-5 \leq z \leq 5$ , який перетинає об'єкт посередині); module\_intensity\_output.txt (значення модуля вектору напруженості на площині, яка знаходиться під тонкостінною конструкцією); module\_intensity\_line\_output.txt (значення модуля вектору напруженості на площині, яка пертинає об'єкт посередині). Після цього користувач може обрати за допомогою якої програми візуалізувати розрахунок: gmsh чи Mathcad.

Розглянемо роботу MBEM на прикладі. Нехай потрібно знайти магнітне поле поблизу та всередині тонкостінного шару радіусом  $r = 1 м$ , з магнітною проникністю  $\mu = 150$ , який знаходиться в зовнішньому полі  $H_{0z} = -1 А / м$ . Центр шару співпадає з початком координат. Товщина шару 1 мм.

Знайдемо магнітне поле всередині та зовні сфери за допомогою розробленого програмного комплексу

MBEM при виборі gmsh та anis3d генераторів. Також результати розрахунку перевіримо в програмі ANSYS.

Знайдемо значення вектору напруженості магнітного поля на відстані 2 м від центру сфери ( $z = -2.0$  м) на відрізку з координатами по осі абсцис  $[-5;5]$  метрів та значення вектору напруженості магнітного поля на відрізку, що проходить через

центр сфери ( $-5 \leq z \leq 5$ ) за допомогою розробленого програмного комплексу MBEM при виборі gmsh та anis3d генераторів.

На рис. 3 приведено поверхнева триангуляція сфери, отримана за допомогою gmsh та anis3d генераторів відповідно:

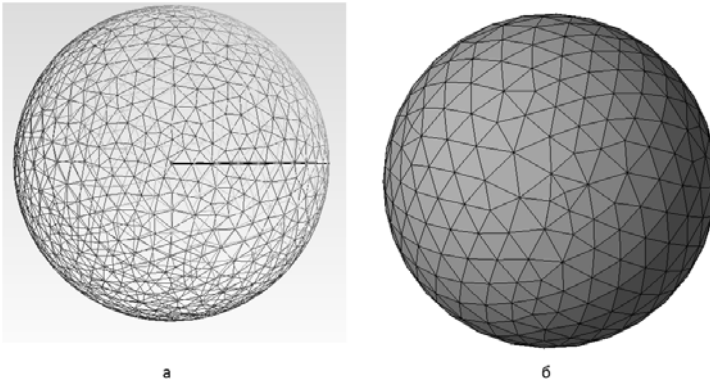


Рис. 3 Поверхнева триангуляція сфери, отримана за допомогою gmsh(a) та anis3d(б) генераторів

Розглянемо результат роботи програмного комплексу при виборі користувачем gmsh генератора. На рис. 4 представлено залежність вектору напруженості магнітного поля на відстані 1 м від центру сфери

( $z = -2.0$  м,  $y = 0.0$  м) на відрізку з координатами по осі абсцис  $[-5;5]$  метрів та значення вектору напруженості магнітного поля на відрізку, що проходить через центр сфери ( $-5 \leq z \leq 5$ ) відповідно.

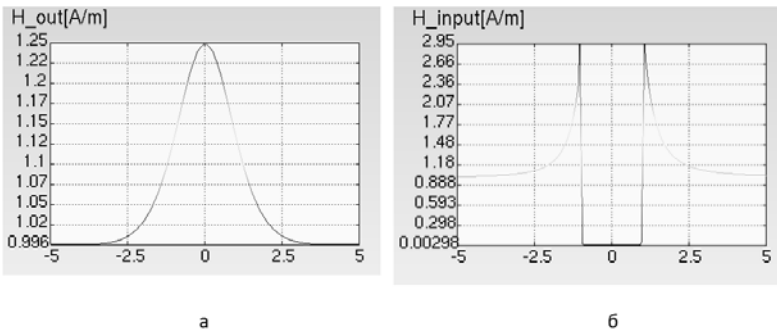


Рис. 4 Значення модуля вектору результуючої напруженості на відрізку ( $-5 \leq x \leq 5$ ,  $y = 0.0$  м,  $z = -2.0$  м) (а) та на відрізку ( $x = 0.0$  м,  $y = 0.0$  м,  $-5 \leq z \leq 5$ ) (б) при виборі gmsh генератора

Розглянемо результат роботи програмного комплексу при виборі користувачем *ani3d* генератора:

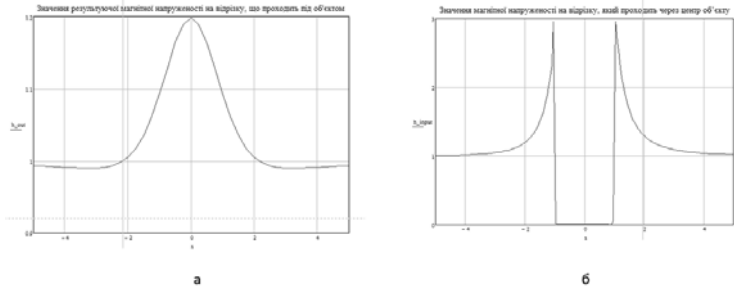


Рис. 5 Значення результуючої напруженості на відрізку  $(-5 \leq x \leq 5, y = 0 \text{ м}, z = -2 \text{ м})$  (а) та на відрізку  $(x = 0 \text{ м}, y = 0 \text{ м}, -5 \leq z \leq 5)$  (б) при виборі *ani3d* генератора

На рис. 6 зображено розподіл вектору напруженості результуючого поля на площині  $-5 \leq x \leq 5, -5 \leq y \leq 5, z = -2$ , розрахований за допомогою ММГЕ (МВЕМ) та МСЕ (ANSYS) відповідно.

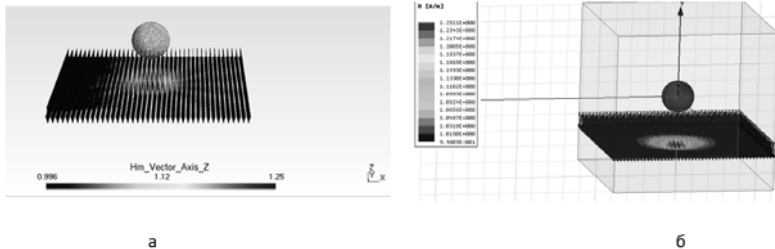


Рис. 6 Розподіл вектору напруженості результуючого поля під сферою (на відстані 1 м)

Як видно з рис. 6 значення вектору результуючої магнітної напруженості  $\vec{H}$  тонкостінної сфери, які розраховані на основі ММГЕ в МВЕМ, були підтверджені результатами, отриманими в ANSYS.

## ВИСНОВОК

Розроблено програмний комплекс МВЕМ для розрахунку магнітних полів тонкостінних конструкцій на базі розробленого модифікованого методу граничних елементів. Цей комплекс дозволяє моделювати основні імовірнісні характеристики знаходження затонулих об'єктів, на підставі яких розробляється стратегія проведення експериментальних досліджень. ММГЕ базується на методі граничних елементів та методі вторинних джерел,

але на відміну від класичного МГЕ, не вимагає наявності матриць фундаментальних розв'язків. Застосування ММГЕ дозволяє розрахувати магнітне поле в тривимірному просторі поблизу та всередині тонкостінної оболонки будь-якої конфігурації, при цьому зменшується розмірність дискретної моделі у порівнянні з МСЕ та МКР.

Розроблений програмний комплекс МВЕМ має дружній інтерфейс, який реалізований на операційній системі Linux, з використанням *gmsh* та *ani3d* генераторів за допомогою C та C++ мов програмування, та працює в багатонитовому режимі. Тобто створено нуву САПР, яка має всі необхідні засоби візуалізації та повністю автоматизована, що відповідає всім сучасним вимогам для розв'язку поставлених задач.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:**

1. Kudryashov Yu.B., Rubin A.B. Radiatsionnaya biofizika (sverhnizkochastotnyye elektromagnitnyye izlucheniya): Uchebnik. Moskva — FIZMATLIT, 2014. 216 p.
2. Lyubimov V.V. Iskusstvennyye i estestvennyye elektro- magnitnyye polya v okruzhayushey cheloveka srede i pribory dlya ih obnaruzheniya i fiksatsii: Preprint / IZMIRAN; №11 (1127) – Troitsk, 1999. – 28 p.
3. Krasnov I.P. Raschetnyye metody sudovogo magnetizma i elektrotehniki // L.: Sudostroenie. — 1986. — 216 p.
4. Ryabenkiy V.M. Modifikovaniy metod granichnih elementlv ta algoritm roz'yazannya zadach obchislennya Indukovanogo magnitnogo polya tonkostlnnih konstruksly v trivimlrmomu prostorl / Chudaykln I.I., Targunakova Yu.D.// «Informatslynl tehnologlyi ta komp'yuterne modelyuvannya», m. Ivano-Franklvs, 2017. — p. 403 – 409
5. <http://gmsh.info/doc/texinfo/gmsh.html>
6. Danilov A. A. Sposobyi postroeniya trYohmernih poverhnostnyih triangulyatsiy i tetradralnyih setok // Nauchno-tehnicheskyy vestnik SPbGU ITMO. 2010. T. 65, № 1. p. 87–92
7. Filippov D.M. Razvitiye metoda vtornichnyh istochnikov dlya modelirovaniya ploskparallelnogo magnitnogo polya elektromagnitnyih sistem: avtoreferat dis. kand. tehn. nauk. — Harkov, 2013. — 24 p
8. Katsikadelis, John T The Boundary Element Method for Engineers and Scientists 2nd Edition. — Academic Press, 2016, 464 p.
9. Ryabenkiy V.M. Metodyi generatsii treugolnoy setki dlya resheniya zadach metodom granichnyih elementov / Chudaykin I.I., Targunakova Yu.D. // VseukraYinska naukovno-tehnichna konferentsiya studentlv ta molodih vchenih «Innovatslyi v sudnobuduvannl ta okeanotehnitsl», — 356-357 p. — 2017.
10. Mirolubov N.N., Kostenko M.V., Levinshyeyn M.L., Tihodeev N.N. Metodyi rascheta elektromaticheskikh poley // «Vysshaya shkola», g. Moskva, 1963. — 414 p.

**Рецензент:** д.т.н., проф. Коваленко І. І.  
Чорноморський національний університет  
імені Петра Могили