

Моделі взаємодії електромагнітного поля рухомих систем низькочастотної індуктивної електророзвідки та провідних феромагнітних тіл

Ігор Бучма

Доктор технічних наук, професор, кафедра комп'ютеризованих систем автоматички, Національний університет "Львівська політехніка", вул. Ст. Бандери 12, м.Львів, 79013, ibuchma1@gmail.com

Предметом статті є огляд запропонованих автором динамічних моделей взаємодії первинного електромагнітного гармонічного поля рухомих електророзвідувальних систем та вторинного (вихрострумового) поля провідного тіла з феромагнітними властивостями і пропозицій нових застосувань таких та подібних систем. Ці моделі дозволяють теоретично обґрунтувати форму сигналу від феромагнітного тіла. Сигнал такої форми часто спостерігався рухомими системами на практиці, але він не мав теоретичного пояснення і тому не використовувався. Метою огляду є ознайомлення широкої наукової спільноти з новими можливостями рухомих електророзвідувальних систем. Зокрема, це здатність рухомих електророзвідувальних систем за відповідними сигналами виявляти в землі та воді провідні тіла не тільки з діамагнітними властивостями, але й з феромагнітними. Це розширює область застосування рухомих електророзвідувальних систем та дозволяє створювати інші рухомі системи за новим призначенням. Показано, що сигнал від тіл з феромагнітними властивостями за формою подібний до одного періоду синусоїди. Амплітуда сигналу пропорційна швидкості руху технічних засобів відносно тіла та частоті гармонічного поля. Перехід одного півперіоду до другого має місце в момент, коли рухома система проходить точку, що є найближчою до тіла. Висновки. Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному. Проведено огляд розроблених теоретичних обґрунтувань форми сигналу від тіл з феромагнітними властивостями для рухомих систем з вимірюванням як точкових фазових характеристик, так і характеристик, усереднених по площі. Запропоновано застосування відомих аероелектророзвідувальних систем за новим призначенням, а також нові рухомі системи для пошуку провідних тіл в зонах автомобільного і залізничного шляхопроводів, сільськогосподарських полів та у водних глибинах.

Ключові слова: гармонічні електромагнітні поля, вихрострумовий метод, електророзвідка, пошукові системи провідних тіл.

Вступ. Розвідка рудних родовищ, які є великогабаритними провідними тілами, що залягають в земних надрах, має важливе значення для зміцнення сировинної бази промислового потенціалу країни. Зараз вже всі родовища, що залягають на невеликих глибинах від земної поверхні, давно відомі, тому на першому плані стоять завдання виявлення і розвідки провідних тіл на значних глибинах від поверхні землі.

Також важливим завданням є обстеження шельфових зон морів, океанів і самих водних глибин до сотень метрів на наявність локальних великогабаритних провідних тіл.

Актуальними є обстеження полів сільськогосподарського виробництва, зон автомобільних та залізничних шляхопроводів на наявність закладок з провідними корпусами.

І тут нерідко вимагається відрізнити провідні тіла з діамагнітними та феромагнітними властивостями.

Аналіз літературних даних та формулювання проблеми. Основним напрямком вирішення таких задач є використання вихрострумовевого методу. Проведення пошуково-розвідувальних робіт в геофізиці базується на застосуванні штучних низькочастотних гармонічних електромагнітних полів. В геофізиці нагромаджений великий досвід створення та використання електророзвідувальних систем. Зокрема, відомі геофізичні системи для дослідження земних глибин на наявність діамагнітних провідних тіл, якими є родовища поліметалічних руд. Такі дослідження базуються на взаємодії первинного лінійно-поляризованого низькочастотного гармонічного електромагнітного поля із зсунутим по фазі відносно нього вторинним лінійно-поляризованим полем вихрових струмів, збуджених первинним полем в локальних тілах з високою електропровідністю. Створене при взаємодії сумарне еліптично поляризоване поле містить інформацію про фізичні властивості тіл [1-3]. Дещо з цієї інформації отримують, вимірюючи фазові характеристики магнітного поля, зокрема: 1) відношення півосей еліпса поляризації сумарного магнітного поля; 2) відношення квадратурної компоненти напруженості вторинного магнітного поля до напруженості первинного магнітного поля [4-6]; 3) фазовий зсув між напруженостями первинного та сумарного магнітних полів.

Низькочастотні гармонічні електромагнітні поля використовують для розв'язання геофізичних задач, пов'язаних з картуванням електропровідності горизонтальних геологічних шарів з глибиною, глибинним пошуком родовищ поліметалічних руд за аномальними зонами високої провідності геологічних шарів. При цьому використовують системи з вимірюванням точкових [1, 3, 4] або усереднених по площі [5, 6] одного із згаданих вище параметрів на кількох частотах. В перших - для збудження первинного електромагнітного поля використовують багатовитковий диполь зі струмом у формі кола діаметром до 2-х м (в наземних системах), або у формі трикутника, дві вершини якого знаходяться на краях крил літака, а третя - в його хвостовій частині (в повітряних системах) [1-4]. В других – не заземлену петлю у формі квадрата з стороною $50 \div 200$ або й більше метрів [5, 6].

Ці електророзвідувальні системи, як рухомі так і нерухомі, використовують тільки для виявлення провідних тіл з діамагнітними властивостями. Це зумовлено тим, що згідно зі статичною моделлю індуктивної електророзвідки [7], яка підтвержується на практиці, рівень вимірюваного сигналу від провідних тіл з феромагнітними властивостями є нижчим ніж поріг чутливості вимірювальних засобів цих систем. Тому для знаходження провідних тіл з феромагнітними властивостями використовують магнітометри, що вимірюють зміни постійного магнітного поля вздовж певного маршруту. А для одночасного пошуку провідних тіл з діамагнітними та феромагнітними властивостями будують комплексні аеропошукові системи з електророзвідувальним та магнітним каналами [4]. Але такі системи нерідко є малоефективними, тому що канали при одночасній роботі створюють завади один одному.

Однак рухомі аероелектророзвідувальні системи при пролітанні над локальними провідними тілами з феромагнітними властивостями реєструють сигнал за формою близький до одного періоду синусоїди. Сигнал такої форми неможливо

пояснити виходячи з статичної моделі взаємодії електромагнітних полів [7]. В роботах [8-10] розроблено теоретичні основи динамічної моделі рухомих засобів низькочастотної індуктивної електророзвідки, що описує взаємодію первинного магнітного поля з провідним тілом з феромагнітними властивостями. Розуміння цієї взаємодії є підставою для її застосування у електророзвідувальних та пошукових роботах таких провідних тіл, що можуть знаходитися у таких мало провідних середовищах як земля або вода.

Мета та задачі дослідження. Проведення огляду робіт, направлених на розроблення теоретичних основ динамічної моделі взаємодії первинного електромагнітного поля, створеного рухомих джерелом, та вторинного електромагнітного поля вихрових струмів, збуджених у провідному феромагнітному тілі. Застосування математичного опису цієї взаємодії для дослідження на його основі принципу утворення форми вихідного сигналу приймального елемента рухомої системи як з точковими, так і з інтегральними вимірюваннями одного з параметрів, згаданих вище. Оцінка впливу швидкості руху системи та частоти електромагнітного поля на амплітуду вихідного сигналу, прогнозування нових сфер та областей застосування подібних систем, розроблення пропозицій та рекомендацій на створення нових систем для нових застосувань.

1. Методи досліджень

В роботі використано теоретико-геометричний підхід до розроблення динамічної моделі для інтерпретації та пояснення процесу взаємодії магнітних полів, математичний опис процесу формування сигналу в приймальному елементі в процесі переміщення системи. Використано правило диференціювання добутку двох функцій, що має місце при математичному описі електрорушійної сили в приймальному елементі. Використано метод виділення обвідної з модульованого сигналу. Впровадження нового поняття порогової відстані $L_{пор}$, на якій рівень сигналу досягає порогу чутливості приймача пошукової системи, що стало важливим кроком, який дозволив отримати математичний опис форми сигналу від провідного тіла з феромагнітними властивостями,

2. Результати досліджень.

2.1 Рухомі системи з точковими вимірюваннями. Реакція нерухомих наземних систем на тіла з феромагнітними властивостями відома. Ці системи на такі тіла не реагують з тієї причини, що, як вже було сказано вище, рівень сигналу від них є нижчим ніж поріг чутливості приймача системи.

По іншому реагує приймач рухомої, наприклад, повітряної системи. Практично відомо, що взаємодія рухомої електророзвідувальної системи з тілом з феромагнітними властивостями спричинює появу сигналу у формі одного періоду синусоїди. Логічно припустити, що перехід від одного півперіоду сигналу до другого (перехід через нульове значення) має місце саме в момент, коли відстань між системою і тілом є найменшою. Цей сигнал та його форма довгий час не мали теоретичного обґрунтування.

значення такого рознесення складає 120 м при потужності бортового генератора 300 Вт. Подальше збільшення глибинності вимагатиме: збільшення рознесення генераторного диполя ГД та магнітоприймачів М1 і М2; збільшення потужності бортової мережі та збільшення висоти літака. Але такі дії є малоефективними, тому що інтенсивність магнітного поля зменшується обернено пропорційно квадрату відстані. При цьому найменша висота гондоли від досліджуваної поверхні, з огляду на безпеку літака та його екіпажу, не повинна бути меншою ніж 50 м [1]. Оскільки потужність бортової мережі обмежена, то з погляду економічності, бажано було б розмістити елемент, що генерує електромагнітне поле, якомога ближче до досліджуваної поверхні. В такій структурі цього зробити неможливо.

На рис.1 нижче лінії розділу середовищ повітря-грунт (вода) зображено провідне тіло з феромагнітними властивостями. Для спрощення прийнято, що маршрут літака проходить над центром цього тіла. З рис.1 випливає наступна залежність для горизонтальної складової напруженості магнітного поля $H_{2xmn}(t)$, що приймається вертикальним магнітоприймачем М1,

$$H_{2xmn}(t) = \cos\alpha(t) H_{2mnn} \sin\omega t \quad (1)$$

де H_{2mnn} - амплітуда напруженості вторинного магнітного поля в точці приймання; $\alpha(t)$ - кут в точці приймання між горизонтальною прямою та напрямком на центр провідного магнітного тіла, який можна визначити з виразу

$$\alpha(t) = \arctg(h/k_x),$$

де h – висота польоту над центром тіла; k_x – відстань від точки приймання до вертикалі на маршруті польоту, що проходить через центр тіла.

Відстань k_x є функцією часу, і її можна виразити через швидкість польоту v літака

$$k_x = -L_{nop} + vt,$$

де t - час, відлік якого розпочинається в момент, коли $k_x = -L_{nop}$.

У магнітоприймачі М1 (рис.1) при перетворенні магнітного потоку в е.р.с. має місце диференціювання магнітного потоку. Оскільки площа перерізу S , кількість витків магнітоприймача W та магнітна проникність μ сердечника магнітоприймача М1 мають сталі значення, то їх виносимо за знак диференціювання. Тоді е.р.с. $e_{2xmn}(t)$, що індукується на виході магнітоприймача М1, залежить від напруженості магнітного поля в точці приймання. Тому для неї справедливий вираз

$$\begin{aligned} e_{2xmn}(t) &= -WS \frac{dB_{2xmn}(t)}{dt} = -WS\mu \frac{dH_{2xmn}(t)}{dt} = \\ &= -WS\mu H_{2mnn} \{ \omega \cdot \cos\omega t \cdot \cos\alpha(t) + \sin\omega t \cdot \frac{d}{dt} [\cos\alpha(t)] \} \end{aligned} \quad (2)$$

де H_{2xmn} амплітуда горизонтальної складової напруженості магнітного поля в точці приймання.

Для спрощення вважаємо її незмінною в процесі польоту.

Оскільки е.р.с., що наводиться первинним полем при диференціюванні також зсувається на $\pi/2$, тобто з синусоїдальної стає косинусоїдальною, то синусоїдальна

складова виразу (2) буде квадратурною складовою е.р.с. вторинного магнітного поля. Отже, на підставі (2) можемо записати вираз для квадратурної складової сигналу вторинного магнітного поля як

$$\begin{aligned} e''_{2xmn}(t) &= -WS\mu H_{2xmn} \cdot \sin \omega t \cdot \frac{d}{dt} [\cos \alpha(t)] = \\ &= -WS\mu H_{2xmn} \cdot \sin \omega t \cdot \frac{d}{dt} [\cos \arctg(h/k_x)] = \\ &= WS\mu H_{2xmn} \cdot \sin \omega t \cdot [\sin \arctg(h/-L_{nop} + vt)] \cdot \\ &\cdot \frac{1}{1 + (h/-L_{nop} + vt)^2} \cdot \frac{-hv}{(-L_{nop} + vt)^2} \end{aligned}$$

Спростивши останній вираз отримуємо

$$e''_{2xmn}(t) = WS\mu H_{2xmn} \cdot \sin \omega t \cdot [\sin \arctg(h/-L_{nop} + vt)] \cdot \frac{-hv}{[(-L_{nop} + vt)^2 + h]} \quad (3)$$

Розглядаючи на основі (3) якісну картину можна сказати, що вихідний сигнал вимірювача системи описується обвідною амплітуд виразу (3) (рис.2).

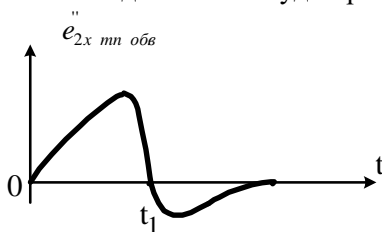


Рис.2. Вихідний сигнал вимірювача системи

При зростанні t від 0 сигнал спочатку зростає з ростом t у зв'язку зі зменшенням члена

$$(-L_{nop} + vt)$$

до нуля, де досягне свого максимуму при $t = t_1$, а тоді перейде у від'ємну область на свій максимум та почне спадати в міру зростання цього члена при $t > t_1$, тобто вміру віддалення пошукової системи від феромагнітного тіла.

На рис.3 подано варіанти сигналів (обведено колом), від тіл з феромагнітними властивостями, які реєструються самописцем аероелектророзвідувальної системи, що вимірює відношення півосей еліпса поляризації магнітного поля.

З рис.3а видно, що від початку координат іде запис відношення півосей еліпса поляризації магнітного поля, що зумовлене невисокою провідністю досліджуваного півпростору. При наближенні до моменту t_1 з'являється сигнал від локального провідного феромагнітного тіла, що знаходиться у досліджуваному півпросторі на маршруті польоту. Іноді амплітуда сигналу від феромагнітного тіла може бути такою великою, що нижня частина синусоїди може заходити у від'ємну область.

Якщо розміри тіла в напрямі польоту є значними, то в сигналі може з'явитися розтягнута середня зона, яку можна назвати зоною нечутливості до феромагнітного тіла. В цьому випадку сигнал може прийняти вигляд, наприклад, такий, як на рис.3б. Тут момент t_1 відповідає ближній границі тіла, а $-t_2$ —дальній границі тіла.

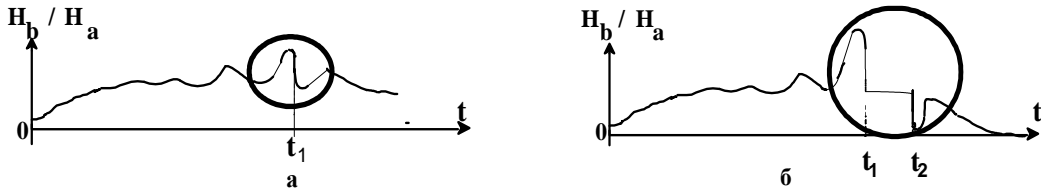


Рис.3.Варіанти сигналу від різних феромагнітних тіл: а-локального; б- великих розмірів

З рис.3б видно, що в сигналі з'явилася зона нечутливості до феромагнітного тіла. Вона знаходиться між моментами часу t_1 та t_2 . Тобто це місце в сигналі можна трактувати як стаціонарний режим, в якому електророзвідувальна система не реагує на провідне феромагнітне тіло.

2.2 Рухомі системи з інтегральними вимірюваннями.

2.2.1 Повітряні системи.

Основний недолік точкових вимірювань полягає в тому, що збудник поля знаходиться далеко від досліджуваної поверхні. Тому такі системи менш економічні. При обмеженій потужності джерела живлення це зменшує глибинність досліджень.

При інтегральних вимірюваннях збудником поля та приймальним елементом є суміщені генераторна та приймальна петлі, що знаходяться близько до досліджуваної поверхні. Але розміри петель такі, що піднімати їх над поверхнею за допомогою літака нема можливості.

Проте кілька років тому у теленовинах було показано, що в Китаї реалізували синхронний політ тисяч безпілотних літальних апаратів (БЛА), робота яких синхронізувалася від одного комп'ютера. Для того щоб підняти квадратні петлі з стороною розміром 200×200 м² достатньо буде 100, можливо навіть менше безпілотних літальних апаратів. Тому динамічна модель петлевої системи заслуговує на те, щоб її тут проаналізувати.

На рис.4 подано генераторну та вимірювальну суміщені петлі, вмонтовані в паз жорсткого каркасу, який переноситься над досліджуваним півпростором за допомогою множини БЛА. Тут генератор, варіометр, вимірювач квадратурної компоненти магнітного поля та реєстратор результату вимірювання не показані, але вважається, що вони розміщені в одному або у кількох БЛА. Каркас з петлями підвішений до множини БЛА, робота яких синхронізується від одного комп'ютера.

Розглянемо реакцію такої системи на тіло з феромагнітними властивостями. Для спрощення будемо вважати, що в площині приймання (в середині вимірювальної петлі (ВП)) модулі напруженостей первинного поля $H_{1m} \sin \omega t$ і вторинного поля $\pm H_{2m} \sin \omega t$ синфазні (або протифазні). Це означає, що діамагнітного тіла нема, є тіло з феромагнітними властивостями.

Вважатимемо, що напрям у просторі напруженості вторинного магнітного поля в площині приймання, зокрема, в середині ВП лежить на лінії, що з'єднує центр ВП з

центром тіла з феромагнітними властивостями. Напрямок напруженості первинного поля перпендикулярний до площини генераторної та вимірювальної петель. Система рухається горизонтально до феромагнітного тіла з швидкістю v . Отже рис.4 є геометричною інтерпретацією і відображає динамічну модель такої системи.

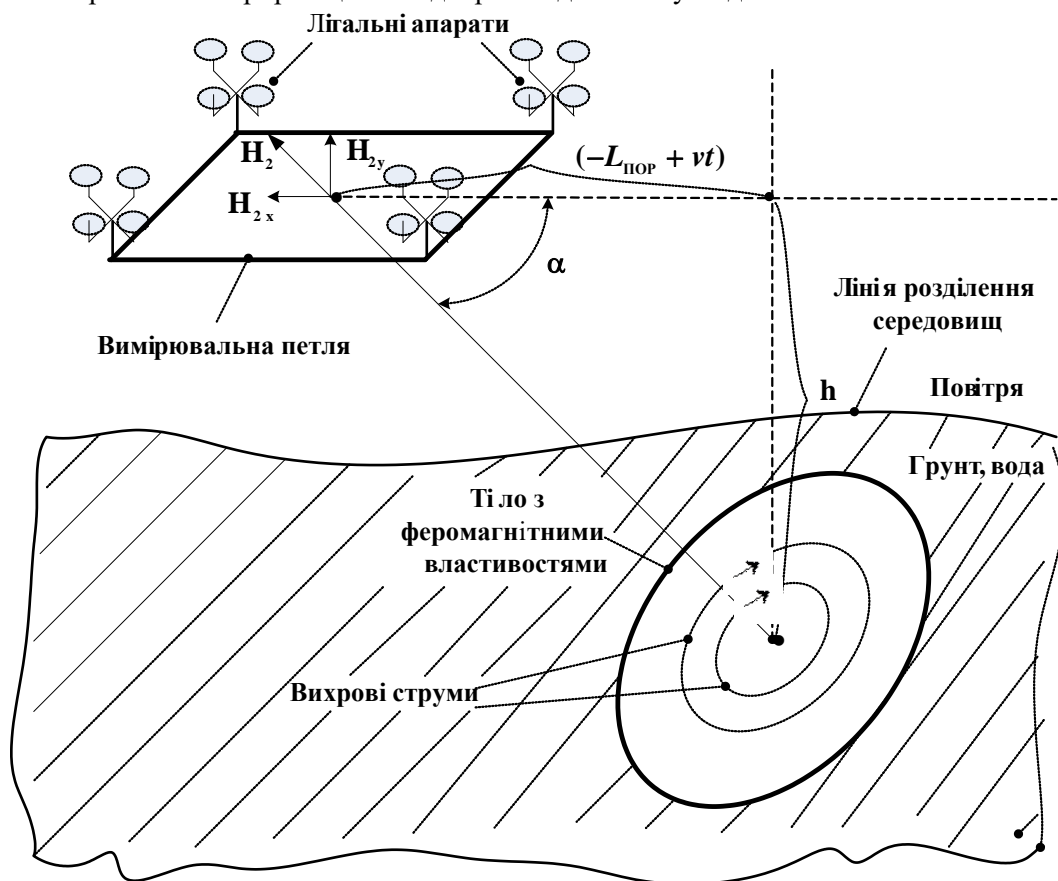


Рис.4. Геометрична інтерпретація моделі взаємодії первинного та вторинного електромагнітних полів в системі з вимірюванням усереднених по площі параметрів.

Тут v -швидкість руху каркасу з петлями, переміщуваного множиною БЛА у горизонтальній площині.

На основі рис.4 запишемо вираз для е.р.с. у вимірювальній петлі, що наведена вторинним магнітним полем

$$e_{2y} = -\frac{d\Phi_{2y}(t)}{dt} = -WS \frac{dH_{2y}(t)}{dt}$$

Виходячи з рис.4 та враховуючи горизонтальний рух петлі, для вертикальної складової напруженості вторинного магнітного поля в площині приймання можна написати

$$H_{2y}(t) = H_{2m} \cdot \sin \omega t \cdot \sin \alpha(t) = H_{2m} \cdot \sin \omega t \cdot \sin\left(\operatorname{arctg} \frac{h}{-L_{\text{ПОР}} + vt}\right), \quad (4)$$

де H_{2m} - амплітуда складової вторинного магнітного поля;

$$\alpha(t) = \operatorname{arctg} \frac{h}{l_x(t)} = \operatorname{arctg} \frac{h}{-L_{\text{ПОР}} + vt} - \text{змінний у часі кут між горизонтальною лінією}$$

польоту та напрямком на центр провідного тіла з феромагнітними властивостями;
 h - висота польоту генераторної та вимірювальної петель над центром тіла, що залягає в досліджуваному півпросторі (земля, вода); $l_x(t) = -L_{\text{ПОР}} + vt$ - проекція відстані між центром вимірювальної петлі та центром провідного тіла на горизонтальну лінію, що співпадає з напрямком руху системи. На основі (4) запишемо вираз для е.р.с. вимірювальної петлі.

$$e_{\text{ВП}} = -WSH_{2m} \left\{ \cos \omega t \cdot \omega \cdot \sin\left(\operatorname{arctg} \frac{h}{-L_{\text{ПОР}} + vt}\right) + \right. \\ \left. + \sin \omega t \cdot \frac{d}{dt} \left[\sin\left(\operatorname{arctg} \frac{h}{-L_{\text{ПОР}} + vt}\right) \right] \right\}, \quad (5)$$

W - кількість витків ВП; S - площа витка.

Другий член в останньому виразі - це квадратурна складова, яка виникає у ВП з синфазної компоненти вторинного магнітного поля, коли магнітний потік диференціюється ВП. Цей другий член буде вимірюватися вимірювачем, а результати вимірювання будуть записуватися реєстратором.

Проаналізуємо поведінку квадратурної складової сигналу при наближенні нашої системи до феромагнітного тіла, при пролітанні над ним та при віддаленні від нього.

На підставі виразу (5) напишемо залежність, що описує поведінку тільки квадратурної складової

$$e_{\text{КВ}} = -\omega WSH_{2m} \sin \omega t \cdot \sin\left(\operatorname{arctg} \frac{h}{-L_{\text{ПОР}} + vt}\right) = \\ = \omega WSH_{2m} \sin \omega t \cdot \sin\left(\operatorname{arctg} \frac{h}{L_{\text{ПОР}} - vt}\right) \quad (6)$$

Вираз (6) описує сигнал, обвідна якого має вигляд, подібний до одного періоду синусоїди (рис.2).

В момент t_1 , коли повітряна система пролітає над тілом з феромагнітними властивостями, обвідна сигналу різко змінює знак. Якщо в даний момент зареєструвати координати центру суміщених петель, то їх можна тлумачити як координати центру тіла з магнітними властивостями, що знаходиться у півпросторі під системою.

Тут зовсім не важливо, що рухається: чи система відносно тіла, чи тіло відносно системи. Якщо рухається система відносно нерухомого тіла, то треба реєструвати координати розташування тіла. Якщо ж рухається тіло відносно нерухомої системи,

то треба реєструвати час коли тіло пройшло біля системи. Якщо рухаються і система і тіло, то треба реєструвати і координати і час.

Отже форма сигналу у всіх випадках буде однаковою. Тому, використовуючи стаціонарну систему, можна реєструвати рухомі тіла. Але за допомогою рухомої системи можна відстежувати також і зміну координат рухомого тіла. Для уточнення координат виявленого тіла можливо необхідно буде змінювати напрям повторних польотів, зокрема, пролітати через точку, в якій виявлено тіло, у напрямку, перпендикулярному попередньому маршруту. Другий політ дасть змогу уточнити координати тіла та відстежувати їх за наступними польотами.

Приклад узагальненої структури системи з інтегральними вимірюваннями подано на рис.5.

Тут використані такі позначення: ГП та ВП – відповідно генераторна та вимірювальна петлі; К-каркас з канавкою, в яку вставлені ГП та ВП; Г- генератор струму (напруги); В-повітряний варіометр; ВЧ-вимірювач фазового зсуву або квадратурної компоненти; Р-реєстратор; ДП – дистанційний пульт управління; БЛА-безпілотний літальний апарат.

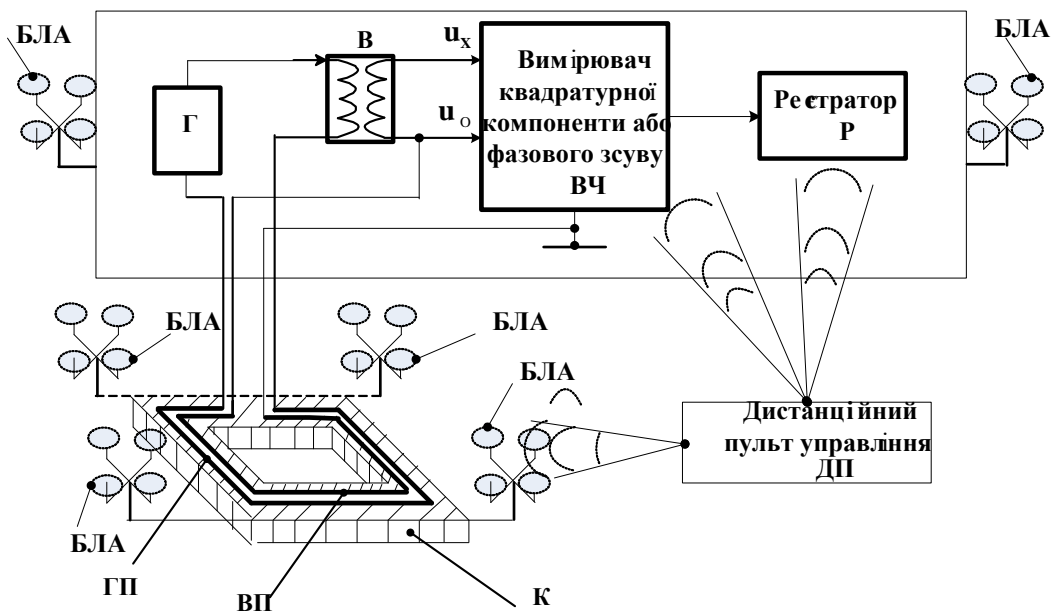


Рис.5. Узагальнена структура системи з інтегральними вимірюваннями

2.2.2. Надводні системи. Рухомі надводні системи з інтегральними вимірюваннями можуть встановлюватися на одному великому за площею палуби швидкохідному кораблі навіть не обов'язково з дерев'яним корпусом. При цьому генераторна та вимірювальна петлі розкладаються по периметру палуби. Очевидно, що підібрати такий корабель, який би задовольняв всі вимоги важко. Особливо це може стосуватися збільшення площі палуби та швидкості руху. Тому глибинність досліджень такого варіанту може бути недостатньою.

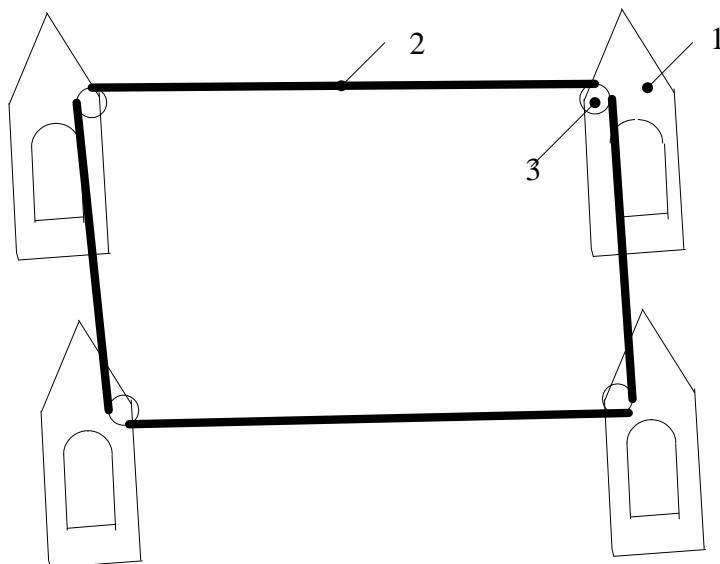


Рис.6. Варіант надводної системи на основі чотирьох катерів:
1-катер; 2-суміщені петлі; 3-втягувально-випускний пристрій

В цьому плані більшу глибинність може забезпечити варіант, який використовує 4-ри швидкохідних невеликих скутери чи катери. В цьому варіанті катери розташовуються по кутах квадрата, який утворений суміщеними генераторною та вимірювальною петлями. Для забезпечення більшої механічної міцності цього квадрата в нього можна вкласти міцний синтетичний мотузок.

Для того, щоб сторони квадрата не провисали і не падали у воду, вони повинні бути весь час натягнуті. Забезпечити натяг синхронним рухом катерів напевно не вдасться. Тому на кутах квадрата петлі мають намотуватися на втягуючі та відпускаючі пристрої, що в якійсь мірі нагадують роботу пристроїв натягування ременів безпеки в автомобілях. Але, на відміну від автомобільних пристроїв натягування ременів безпеки, пристрої натягування петель не повинні фіксувати петлі при різких натягуваннях, а відпускати чи втягувати петлі забезпечуючи при цьому достатній натяг петель, щоб вони не провисали і не могли торкатися води. Такий варіант пошукової системи подано на рис. 6.

2.2.3. Наземні та повітряні системи для автомобільних та залізничних шляхопроводів. Рухомі *наземні* системи з інтегральними вимірюваннями можуть бути використані для виявлення тіл з магнітними та діамагнітними властивостями в зоні шляхопроводів: автомобільного та залізничного.

Принципової різниці між такими системами немає. Відрізнитися вони будуть тільки рухомими платформами-носіями, на яких буде встановлена пошукова система. Для використання в зоні автомобільних шляхопроводів такою платформою може бути квадроцикл, а в зоні залізничного полотна – дрезина. На небезпечних ділянках доцільно було б використовувати самокеровані роботизовані платформи.

Приклад структури вихрострумової системи, що може бути використана для обстеження провідних тіл в зоні полотна автомобільного чи залізничного шляхопроводу подана на рис.7.

Така система складається з сумішених та ізольованих між собою генераторної ГП та вимірювальної ВП провідних петель однакових розмірів, виконаних у вигляді багатовиткового навою, жорсткого ізоляційного каркасу К у вигляді квадрата чи прямокутника певних розмірів, по периметру якого виконано паз. В цьому пазу розміщено багатовитковий навій генераторної ГП та вимірювальної ВП петель. На рис. 7 такий каркас К винесено попереду рухомої платформи (РП), а в принципі, для зменшення габаритів, каркас К може охоплювати несучу рухоми платформу РП.

До системи входить генератор (Г) синусоїдальної напруги (струму), варіометр (В), вимірювач (ВМ) одного з двох параметрів: відношення модуля напруженості квадратурної компоненти вторинного магнітного поля до модуля напруженості первинного магнітного поля або фазового зсуву між напруженістю первинного магнітного поля та напруженістю сумарного (первинного та вторинного) магнітного поля, реєстратор (Р) результатів вимірювання, реєстратор координат системи в момент появи сигналу від феромагнітного чи діамагнітного тіл типу GPS, розміщені на рухомій платформі РП.

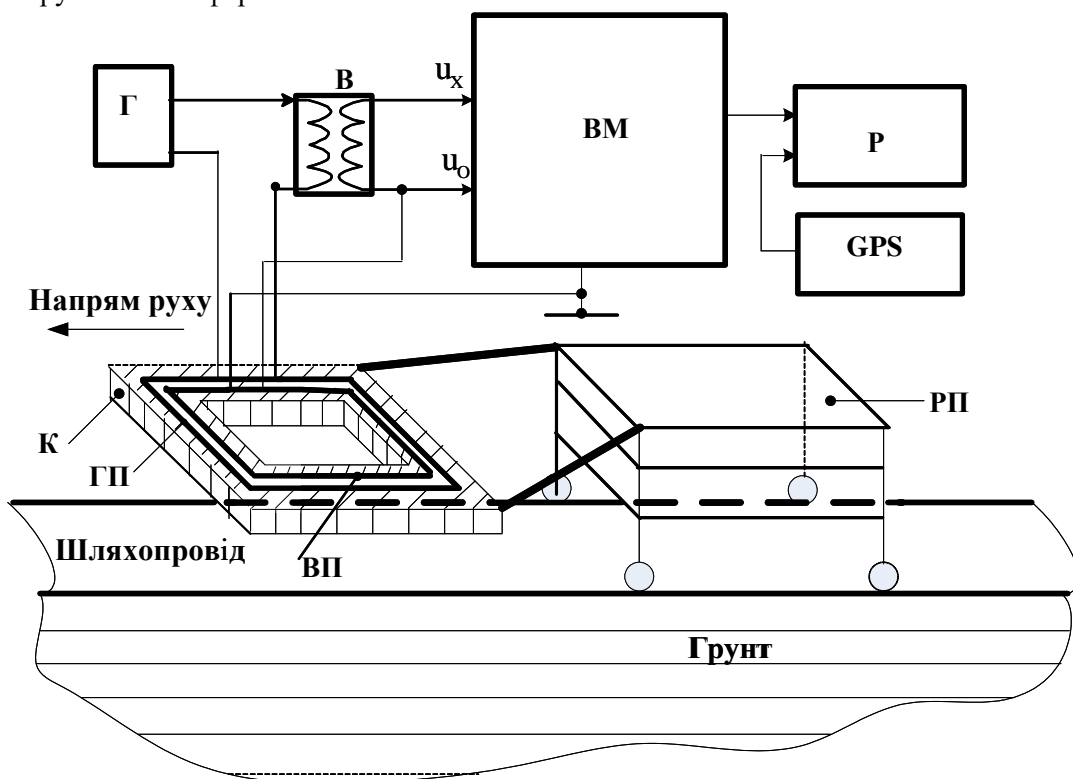


Рис.7. Наземна рухома вихрострумова система для виявлення провідних тіл в зонах автомобільного або залізничного шляхопроводів

Як вже було сказано тут жорсткий ізоляційний каркас К монтується навколо РП або за її межами, наприклад, перед нею, і своєю шириною може, при необхідності,

перекривати шляхопровід та навіть частину узбіччя, а решта елементів системи встановлені на самій РП, що рухається вздовж шляхопроводу.

Генератор Г живить синусоїдальним струмом послідовно з'єднані первинний навій варіометра В та ГП, розміщену разом з ВП у жорсткому ізоляційному каркасі К, прикріпленому до рухомої платформи РП. Синусоїдальний струм ГП створює у навколишньому просторі первинне електромагнітне поле, яке поширюючись, проникає з повітря у досліджуваній мало провідний півпростір (землю, тобто, ґрунт) і, зустрічаючи на своєму шляху провідні тіла, індукує в них вихрові струми. Ці струми створюють вторинне електромагнітне поле, яке сумується з первинним полем, зсуваючи сумарне поле за фазою. Магнітна складова сумарного поля наводить е.р.с. у вимірювальній петлі ВП. Ця е.р.с. подається на один вхід вимірювача ВМ, а на другий його вхід поступає різниця сигналів ВП та вторинної обмотки варіометра В, які ввімкнені послідовно-зустрічно.

При появі тіл з діамагнітними чи феромагнітними властивостями від ВМ на GPS поступить сигнал для фіксації координат системи та часу. Потім ці дані передаються на реєстратор Р для запам'ятовування.

Крім цього, в зоні автошляхопроводу, залізничного шляхопроводу та в зоні сільськогосподарських полів як рухома платформа може бути використаний одиниць БЛА. Варіант з використання БЛА як несучої платформи подано на рис.8.

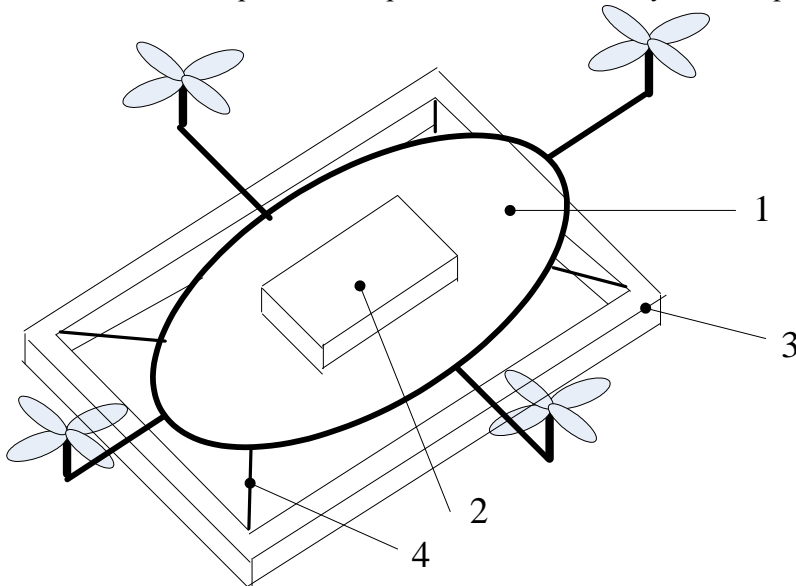


Рис.8. Система дослідження автомобільних та залізничних шляхопроводів і сільськогосподарських угідь: 1-БЛА; 2-генератор з приймачем; 3-каркас з генераторною та вимірювальною петлями; 4-підвісний стержень

При цьому генератор та вимірювач (2) будуть розміщені, наприклад, на самому БЛА (1). А каркас (3) з вмонтованими в нього генераторною та вимірювальною петлями підвіщується знизу БЛА за допомогою жорстких стержнів (4).

3. Обговорення результатів. Проведений аналіз не враховує конкретні відстані від пошукової системи до провідних тіл, не прив'язаний до форми, розмірів, значень електричних та магнітних параметрів тіла, тому має в певній мірі якісний характер.

Такі системи підходять більше для вирішення завдань пошукового характеру. Вони можуть працювати на одній частоті. Системи ж геофізичного напрямку мали б бути багаточастотними.

Фіксуючи системою GPS координати центру петель квадроцикла, залізничної дрезини, якщо каркас їх охоплює, чи БЛА в момент переходу сигналу у вигляді одного періоду синусоїди через нуль, можна визначити перпендикулярну до маршруту площину, в якій знаходиться провідне тіло з феромагнітними властивостями під землею чи під водою.

При використанні повітряних систем над поверхнею води чи суходолу та надводних корабельних систем для уточнення координат місцеположення тіла під землею чи під водою може знадобитися ще одне проходження за маршрутом, що лежить у площині, в якій виявлено тіло перший раз. Якщо ж тіло переміщається, то очевидно, що для відслідковування за його переміщеннями прийдеться зробити не одне проходження.

При обстеженні шляхопроводу після виявлення перерізу з провідним тілом пошук тіла в цьому перерізі треба буде проводити шляхом огляду та проведення деталізаційних робіт.

Висновок. Запропоновані динамічні моделі дозволяють пояснити форму сигналу від провідних тіл з феромагнітними властивостями, що приймається рухомими системами з зондуючими гармонічними полями. Наявність цього сигналу дозволяє використовувати рухомі засоби електророзвідки для пошуку як діамагнітних так і феромагнітних провідних тіл, що залягають у малопровідних середовищах, таких як земні та водні глибини.

При наявності феромагнітного тіла значної протяжності є можливість визначити його границі.

Відомі рухомі засоби електророзвідки можуть розширити свою область застосування та конкурувати в цьому з комплексними станціями, які є значно дорожчими як у виробництві, так і в експлуатації. Або навіть можуть їх замінити.

Глибинність досліджень залежить від частоти електромагнітного поля, швидкості руху, конструкції системи, зокрема, від розмірів і розташування генераторного та приймального елементів поля, а також інших факторів. І тут системи з інтегральними вимірюваннями мають перевагу за рахунок розташування генераторного елемента ближче до поверхні досліджуваного півпростору (землі або води). На частотах в одиниці Гц глибинність пошуку може сягати сотень метрів.

Створення рухомих наземних і повітряних систем дозволить моніторити зони автомобільних і залізничних шляхопроводів, сільськогосподарських угідь на наявність тіл з феромагнітними та діамагнітними властивостями.

Нерухомі системи можуть реєструвати моменти часу, коли повз них проходять (проїжджають або пролітають) провідні тіла з діа- та феромагнітними властивостями і здійснювати їх підрахунок.

Література

1. Mizyuk L. Ya., Podzharyiy V. M., Prots R. V. Measurement of magnetic field invariants in electrical prospecting. - Kyiv: Naukova dumka, 1976. -231s. (Rus)
2. Yakubovskiy Yu. V. Electrical prospecting. -Moskva: Nedra, 1973.-302s.(Rus)
3. Svetov B. S., Mizyuk L. Ya., Podzharyiy V. M. Ore electrical prospecting by the method of elliptically polarized field. -Moskva: Nedra, 1969.-182s.(Rus)

4. Equipment for airborne geophysical prospecting with magnetic and electromagnetic information channels/Vakulskiy A.A., Mizyuk L.Ya., Prots R.V., Sikachevskiy Yu.Yu.- Kyiv: Naukova dumka, 1985. -253s. (Rus)
5. Svetov B.S.Theory, methodology and interpretation of low-frequency inductive electrical prospecting.-Moskva: Nedra, 1973.-254s.(Rus)
6. Laptev V.F., Lobacheva E.P., Pris G.V., Svetov B.S.Two-loop method of inductive low-frequency electrical prospecting//Proceedings of TsNIGRI.-Moskva: TsNIGRI, 1972. –Vol. 104: Ore geophysics. –S. 86-95.(Rus)
7. Myziuk L.Ya. On the state and some prospects for the development of information-measuring systems for ground-based methods of inductive electrical prospecting. Selection and transmission of information. - Kyiv: Naukova dumka, 1970. Vol 26.-S. 92-100. (Rus)
8. Buchma I.M. Method of aeroelectric exploration of leading magnetic ores. Information technologies and systems. No 1-2, 2001. S. 115-122.(Ukr)
9. Buchma I.M.Perspectives for expanding the applications of eddy current aeroelectric prospecting systems with artificial harmonic fields.Avtomatyka, vymiriuvannia, keruvannia. No 880, 2017.-S.3-9.(Ukr)
10. Buchma I.M. Eddy current method and structure of hardware for finding local conductive bodies in the area of the highway.Avtomatyka, vymiriuvannia, keruvannia. No 1, 2019.-S.1-6.(Ukr)

Models of the interaction of the electromagnetic field of mobile systems of low-frequency inductive electrical exploration and conducting ferromagnetic bodies

Buchma Ihor

The subject of the article is a review of the author's proposed dynamic models of the interaction of the primary electromagnetic harmonic field of mobile electromagnetic exploratory systems and the secondary (eddy current) field of a conducting body with ferromagnetic properties and proposals for new applications of such and similar systems. These models make it possible to theoretically substantiate the shape of the signal from a ferromagnetic body. A signal of this form was often observed by moving systems in practice, but it had no theoretical explanation and was therefore not used. The purpose of the review is to acquaint the wider scientific community with the new possibilities of mobile electromagnetic exploratory systems. In particular, this is the ability of mobile electromagnetic exploratory systems to detect conductive bodies not only with diamagnetic properties, but also with ferromagnetic ones in the ground and water, based on appropriate signals. This expands the area of application of mobile electromagnetic exploratory systems and allows to create of other mobile systems for a new purpose. It is theoretically shown that the signal from bodies with ferromagnetic properties is similar in shape to one period of a sinusoid. The amplitude of the signal is proportional to the speed of movement of technical means relative to the body and the frequency of the harmonic field. The transition from one half-period to another takes place at the moment when the moving system passes the point closest to the body. Conclusions. The scientific novelty of the obtained results is as follows. A review of the developed theoretical justifications of the waveform from bodies with ferromagnetic properties for moving systems with the measurement of both point phase characteristics and characteristics averaged over the area are carried out. It was proposed to use well-known aerial electromagnetic exploratory systems for a new purpose, as well as new mobile systems for searching conductive bodies in the areas of road and railway overpasses, agricultural fields and in water depths.

Key words: harmonic electromagnetic fields, eddy-current method, electrical exploration, search systems for conducting bodies.

Отримано: 21.11.2023