

## ПЕРСПЕКТИВИ РОЗШИРЕННЯ ЗАСТОСУВАНЬ ВИХРОСТРУМОВИХ АЕРОЕЛЕКТРОРОЗВІДУВАЛЬНИХ СИСТЕМ ЗІ ШТУЧНИМИ ГАРМОНІЧНИМИ ПОЛЯМИ

© Бучма І. М., 2017

Стаття присвячена розвитку теорії динамічної моделі пари “вихрострумова електророзвідувальна система–ферромагнітне провідне тіло”, яка враховує швидкість взаємного переміщення електророзвідувальної системи відносно провідного тіла. Динамічна модель дає змогу пояснити форму сигналу від провідного тіла із ферромагнітними властивостями у вигляді одного періоду синусоїди або двох окремих півперіодів, рознесених між собою в часі, залежно від розмірів тіла. Теоретичне обґрунтування форми сигналу від провідних тіл з ферромагнітними властивостями дасть змогу розширити область застосування рухомих вихрострумівих засобів.

**Ключові слова:** бортові системи, вихрострумова електророзвідка, динамічна модель, розширення застосування,

The article is devoted to the theory of dynamical model couples eddy current electrical system – leading ferromagnetic body, which takes into account the speed of mutual movement of electrical system relative to the leading body. The dynamic model can explain signal form from the leading body with ferromagnetic properties in a single period of sinewave or two half-periods, separated each other in time, depending on body sizes. The theoretical substantiation of the shape of a signal from conducting bodies with ferromagnetic properties will expand the range of application of moving eddy current means.

**Keywords:** Airborne systems, Eddy current electrical prospecting, Dynamic model, Extension of application.

### Вступ

У статті йдеться про вихрострумівий метод пошуку провідних тіл у малопровідному середовищі, такому як поверхневі шари землі чи води. Метод реалізується наземними та аерозасобами електророзвідки, що використовують штучні гармонічні електромагнітні поля [1]. Такими провідними тілами можуть бути рудні родовища поліметалічних та інших провідних руд. Вихрострумівий метод пошуку провідних тіл за допомогою гармонічних електромагнітних полів – не єдиний метод, що використовується для пошуку місць залягання великогабаритних провідних тіл. Для розв’язання подібних задач використовуються також інші електромагнітні методи, такі як метод перехідних процесів, званий ще методом становлення електромагнітного поля, та метод природних електромагнітних полів [1]. При цьому можуть проводитися пошукові роботи як наземними засобами, так і повітряними, встановленими на борту літального апарату. Найчастіше засоби повітряної електророзвідки встановлюються на легких літаках типу АН-2 [2].

Основною перевагою вихрострумівого методу гармонічними полями є його висока завадостійкість, що забезпечується смуговою фільтрацією сигналу.

Вихроструміві аероелектророзвідувальні засоби з використанням гармонічних полів переважно використовуються лише на суходолі для пошуку місць залягання немагнітних родовищ поліметалічних руд на глибинах від кількох десятків до ста і більше метрів. При цьому вимірюється

відношення півосей еліпса поляризації сумарного магнітного поля, оскільки цей параметр є інваріантним відносно орієнтації приймальних елементів у заданій точці простору [2]. Наземні засоби також вимірюють відношення півосей еліпса поляризації. Але є й такі, що вимірюють відношення квадратурної складової вторинного магнітного поля до складової первинного магнітного поля [3].

Як наземні, так і аероелектророзвідувальні засоби орієнтовані на пошуки тільки діамагнітних поліметалічних руд, а пошуки тіл з феромагнітними властивостями за їх допомогою певний час вважалися неможливими, оскільки рівень вимірюваних параметрів, таких як відношення півосей еліпса поляризації та зведений рівень квадратурної складової вторинного магнітного поля від таких тіл є меншими ніж поріг чутливості вимірювальних засобів. Від таких тіл значно вищим є рівень синфазної складової вторинного магнітного поля, що може складати одиниці відсотка від амплітуди первинного магнітного поля.

### Огляд літературних джерел

Аероелектророзвідувальні засоби, що вимірюють зведене значення синфазної складової вторинного магнітного поля, використовуються рідко через високий поріг чутливості та пов'язану з цим невисоку ефективність розвідки. Високий поріг чутливості засобів з вимірюванням синфазної складової зумовлений змінами відстані між збудником та приймачем поля. Ці зміни викликані нестабільною поведінкою літака на маршруті через повітряні ями та висхідні потоки повітря, хитанням гондоли з приймальними елементами відносно літака, на якому розташований збудник поля. Все це приводить до коливань рівня первинного поля в точці приймання. Ці коливання рівня первинного поля в точці приймання неможливо відрізнити від синфазної складової вторинного магнітного поля. Тому цими коливаннями і визначається поріг чутливості вимірювань, який складає одиниці відсотка. Такий високий поріг чутливості не дає змоги виявляти рудні родовища з феромагнітними властивостями, що залягають на глибинах, більших ніж декілька десятків метрів. А родовища, що залягають на глибинах у кілька десятків метрів, вже давно виявлені навіть за допомогою такого простого засобу, яким є магнітна стрілка.

Тому для глибинних пошуків рудних родовищ з феромагнітними властивостями використовують вимірювальні аерозасоби з магнітним каналом, який дає змогу виявляти аномальні зміни постійного магнітного поля [3]. У деяких випадках створюють комплексні аерозасоби з електророзвідувальним та магнітним каналами [4]. Вони складні у виготовленні, і не завжди обидва канали можуть працювати одночасно, оскільки часто електророзвідувальний канал створює під час роботи завади магнітному каналу. Тому комплексні засоби рідко себе оправдовують з технічного та економічного аспектів.

Усі вищевикладені уявлення про застосування аероелектророзвідувальних засобів впливають зі статичної моделі взаємодії електророзвідувального засобу з провідним тілом, що залягає у практично слабопровідному напівпросторі, яким є поверхневий шар землі чи води. Таку статичну модель запропоновано в роботі [4]. Вона передбачає, що електророзвідувальний засіб та провідне тіло є нерухомими один відносно одного в процесі вимірювання. Модель добре описує взаємодію наземних засобів електророзвідки з провідним тілом у непровідному або слабопровідному напівпросторі.

Статична модель взаємодії електророзвідувального засобу з провідним тілом (Т) подається у вигляді заступної схеми (ЗС) [4]. Ця схема складається зі збудника (З) первинного електромагнітного поля у вигляді електричного контура, що живиться від джерела змінної напруги або струму, та приймача (П) магнітного поля у вигляді другого електричного контура, до виходу якого під'єднано вимірювач (В) ЕРС.

Провідне тіло (Т), що знаходиться у непровідному напівпросторі, на ЗС зображене у вигляді паралельно з'єднаних частотнозалежних індуктивності  $L(\omega)$  та опору  $R(\omega)$ . Між збудником поля та тілом, тілом і приймачем магнітного поля та збудником поля і приймачем поля існують магнітні зв'язки  $M_{3-т}$ ,  $M_{т-п}$ ,  $M_{3-п}$ .

Електрорушійна сила (Е.Р.С.), що збуджується у приймачі магнітного поля, є сумою Е.Р.С. первинного поля  $E_1$  та Е.Р.С. вторинного  $E_2$ .

Своєю чергою, Е.Р.С. вторинного магнітного поля  $E_2$ , подається як сума двох складових:

$$E_2 = E_2' + jE_2'',$$

де  $E_2'$  – синфазна складова;  $E_2''$  – квадратурна складова.

Вимірюваним параметром є зведене до рівня Е.Р.С. первинного магнітного поля значення квадратурної компоненти Е.Р.С. вторинного магнітного поля, тобто  $\frac{jE_2}{E_1}$ , або відношення півосей

еліпса поляризації магнітного поля. Інформативно ці параметри можна вважати рівнозначними, але деякі переваги вимірювання того чи іншого параметра можуть проявлятися при конкретній реалізації апаратних рішень. Так, наприклад, при реалізації аероелектророзвідувальної системи вимірюють відношення півосей еліпса поляризації магнітного поля, оскільки такі вимірювання є інваріантними щодо орієнтації приймальних елементів. При технічних рішеннях наземних систем використовують вимірювання як зведених значень квадратурної складової, так і відношення півосей еліпса поляризації.

Статична модель добре описує нерухому пару “електророзвідувальна система – провідне тіло”. Тому з інтерпретацією результатів наземних електророзвідувальних систем особливих проблем немає. Однак тривалий час ця модель також використовувалася і для інтерпретації результатів, отриманих рухомими електророзвідувальними засобами, зокрема, аерозасобами. Тривала експлуатація аероелектророзвідувальних систем показала, що на основі статичної моделі неможливо пояснити сигнал, що з’являється у формі одного періоду синусоїди при пролітанні аероелектророзвідувальної системи над тілом з феромагнітними властивостями [5]. Стало зрозумілим, що статична модель має свої обмеження, оскільки не враховує швидкості при взаємних переміщеннях.

### Мета і задачі статті

Один з напрямків розширення області застосування рухомих вихрострумових пошукових систем гармонічними електромагнітними полями пов’язаний з необхідністю виявляти провідні тіла з феромагнітними властивостями, що можуть залягати в земних та водних глибинах. Цьому має сприяти теоретичне обґрунтування та інтерпретація сигналу від таких тіл.

Цим пояснюється і мета статті розвинути та спростити теорію динамічної моделі [6] пари “електророзвідувальна система–феромагнітне провідне тіло”, яка враховує швидкість взаємного переміщення електророзвідувальної системи відносно провідного тіла, та створити засади використання цієї теорії для обґрунтування форми сигналу від локального та протяжного провідних феромагнітних тіл, що залягають у малопровідному середовищі, такому як земні та водні глибини. А це створить підстави для розширення області застосування засобів аероелектророзвідки на пошуки тіл з феромагнітними властивостями.

### Виклад основного матеріалу

Динамічну модель розробляли з метою усунення обмежень статичної моделі, зокрема, для пояснення появи сигналу в аероелектророзвідувальному каналі при пролітанні над тілами з феромагнітними властивостями.

Вперше динамічну модель було запропоновано в роботі [6] для аероелектророзвідувальної системи, що вимірює відношення півосей еліпса поляризації магнітного поля. Складність теоретичних викладок при обґрунтуванні моделі створює певну незручність для їх розуміння та використання. Тому, намагаючись спростити ці викладки, будемо відштовхуватися від відомої динамічної моделі [6], яку подано на рис. 1.

Тут збудником електромагнітного поля є генераторний диполь (ГД), розташований у вигляді трикутника на літаку АН-2; М1, М2 – взаємно ортогональні магнітоприймачі горизонтальної та вертикальної компонент магнітної складової поля, розміщені у гондолі, підвішеній до літака за допомогою трос-кабель.

На рис. 1 нижче лінії розділу середовищ повітря-грунт (вода) зображено провідне тіло з феромагнітними властивостями. З рис. 1 випливає така залежність для горизонтальної складової магнітного поля  $H_{2xmn}$ , що приймається вертикальним магнітоприймачем М1,

$$H_{2xmn}(t) = \cos a(t) H_{2m mn} \sin wt, \quad (1)$$

де  $H_{2m mn}$  – амплітуда напруженості вторинного магнітного поля в точці приймання;  $\alpha(t)$  – кут у точці приймання між горизонтальною прямою та напрямком на провідне магнітне рудне тіло, який можна визначити за виразом

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

де  $h$  – висота польоту;  $k_x$  – відстань від точки приймання до вертикалі, що проходить через тіло.

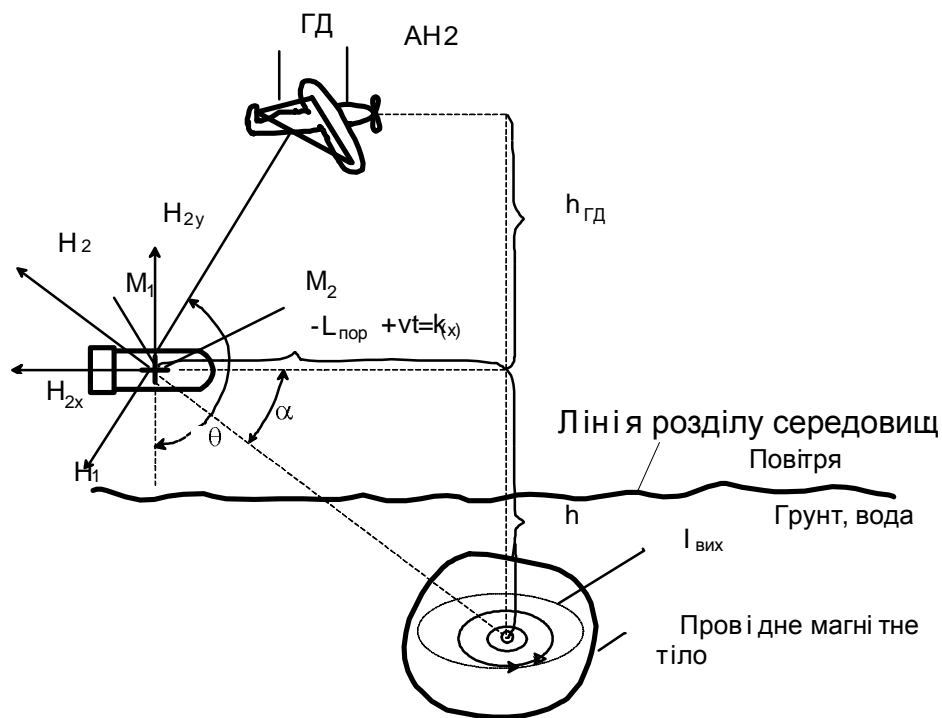


Рис. 1. Динамічна модель рухомої аероелектророзвідувальної системи з вимірюванням відношення півосей еліпса поляризації магнітного поля

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

$$k_x = -L_{пор} + vt,$$

де  $t$  – час, відлік якого розпочинається в момент, коли  $L=L_{пор}$ ;  $L_{пор}$  – відстань, на якій сигнал дорівнює порогу чутливості вимірювача.

У магнітоприймачі М1 (рис. 1) при перетворенні магнітного потоку на ЕРС має місце диференціювання магнітного потоку. Оскільки площа перерізу  $S$ , кількість витків магнітоприймача  $W$  та магнітна проникність  $\mu$  сердечника магнітоприймача М1 мають сталі значення, то їх виносимо

за знак диференціювання. Тоді ЕРС  $e_{2xmn}(t)$ , що індукується на виході магнітоприймача М1, залежить від напруженості магнітного поля в точці приймання. Тому для неї справедливий вираз

$$e_{2xmn}(t) = -WS \frac{dB_{2xmn}(t)}{dt} = -WSm \frac{dH_{2xmn}(t)}{dt} = -WSmH_{2xmn} \{w \cdot \cos wt \cdot \cos a(t) + \sin wt \cdot \frac{d}{dt}[\cos a(t)]\}, \quad (2)$$

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

Оскільки ЕРС, що наводиться первинним полем, при диференціюванні також зсувається на  $\pi/2$ , тобто з синусоїдальної також стає косинусоїдальною, то синусоїдальна складова виразу (2) буде квадратурною складовою ЕРС вторинного магнітного поля. Отже, на підставі (2) можемо записати вираз для квадратурної складової сигналу вторинного магнітного поля як

$$\begin{aligned} e''_{2xmn}(t) &= -WSmH_{2xmn} \cdot \sin wt \cdot \frac{d}{dt}[\cos a(t)] = \\ &= -WSmH_{2xmn} \cdot \sin wt \cdot \frac{d}{dt}[\cos \arctg(h/k_x)] = \\ &= WSmH_{2xmn} \cdot \sin wt \cdot [\sin \arctg(h/-L_{nop} + vt)] \cdot \\ &\cdot \left( \frac{1}{1 + (h/-L_{nop} + vt)^2} \right) \cdot \left( \frac{-hv}{(-L_{nop} + vt)^2} \right) \end{aligned}$$

Спростивши останній вираз, отримуємо

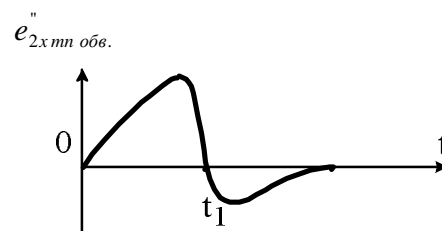
$$e''_{2xmn}(t) = WSmH_{2xmn} \cdot \sin wt \cdot [\sin \arctg(h/-L_{nop} + vt)] \cdot \frac{-hv}{[(-L_{nop} + vt)^2 + h]} \quad (3)$$

Розглядаючи на основі (3) якісну картину, можна сказати, що обвідна амплітуд виразу (3) при зростанні  $t$  від 0 спочатку матиме додатне значення, яке зростатиме з ростом  $t$  у міру зменшення 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 у міру зростання цього члена при  $t > t_1$ , тобто при віддаленні пошукової системи від феромагнітного тіла. Сказане продемонстровано рис. 2.

Рис. 2. Форма сигналу аероелектророзвідувальної системи при пролітанні (момент  $t_1$ ) над тілом з феромагнітними властивостями (отримана з аналізу виразу (3))



На рис. 3 подано варіант сигналу (обведено колом), зареєстрованого самописцем аероелектророзвідувальної системи, що вимірює відношення півосей еліпса поляризації магнітного поля, від тіла з феромагнітними властивостями [3].

Як видно з рис. 3, від початку координат іде запис відношення півосей еліпса поляризації магнітного поля, що зумовлене малопровідним напівпростором, а поблизу моменту  $t_1$  з'являється сигнал від провідного феромагнітного тіла, що знаходиться у досліджуваному напівпросторі на маршруті польоту. Іноді амплітуда сигналу від феромагнітного тіла може бути такою великою, що нижня частина синусоїди може заходити у від'ємну область.

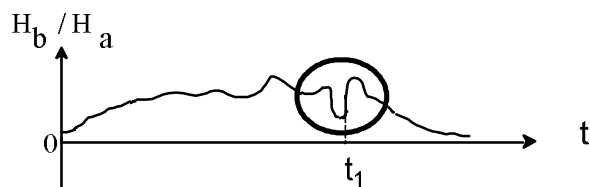


Рис. 3. Фрагмент вихідного сигналу на самописці аероелектророзвідувальної системи під час пролітання над тілом з феромагнітними властивостями в момент  $t_1$

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 набутися вигляду, наприклад, як на рис. 4.

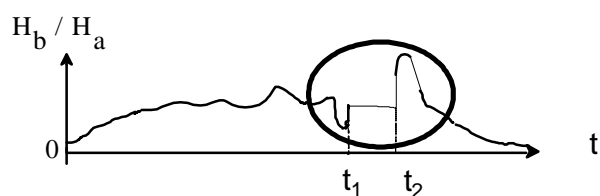


Рис. 4. Приклад сигналу на самописці від феромагнітного тіла зі значними розмірами в напрямку польоту літального апарату

З рис.4 видно, що в сигналі посередині між моментами часу  $t_1$  та  $t_2$  з'являється зона нечутливості до феромагнітного тіла. Тобто це місце в сигналі можна трактувати як стаціонарний режим, в якому електророзвідувальна система є нечутливою до провідного феромагнітного тіла.

### Висновки

Отже, динамічна модель дає змогу пояснити появу сигналу від провідних феромагнітних тіл у засобах аероелектророзвідки гармонічними полями. Тому рухомі засоби електророзвідки здатні здійснювати пошукові роботи як діамагнітних, так і феромагнітних провідних тіл, що залягають у малопровідних середовищах, таких як земні та водні глибини.

Фіксуючи координати аероелектророзвідувальної системи в момент переходу сигналу у вигляді одного періоду синусоїди через нуль, можна визначити місцеположення тіла з феромагнітними властивостями, яке знаходиться під землею чи під водою. Для уточнення координат місцеположення тіла може знадобитися ще один політ через визначену точку, але за маршрутом, перпендикулярним до першого. Якщо ж тіло переміщується, то очевидно, що для відслідковування за його переміщеннями прийдеється зробити не один політ.

При наявності феромагнітного тіла значної протяжності (рис.4) є можливість визначити його границі.

З сказаного випливає, що 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.

1. Якубовский Ю. В. *Электроразведка*. – М.: Недра, 1973. – 302 с. 2. Мизюк Л. Я., Поджарый В. М., Проць Р. В. *Измерение инвариантов магнитного поля при электроразведке*. – К.: Наукова думка, 1976. – 231 с. 3. Бучма І. М. *Засоби вимірювання індуктивної електророзвідки та вихрострумової діагностики*. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту "Львівська політехніка", 2008. – 294 с. 4. *Аппаратура для аэрогеофизической разведки с магнитным и электромагнитным информационными каналами* / А. А. Вакульский, Л. Я. Мизюк, Р. В. Проць, Ю. Ю. Сикачевский;

Под ред. Л. Я. Мизюка. – К.: Наукова думка, 1985. – 253 с. 5. Мизюк Л. Я. О состоянии и некоторых перспективах развития информационно-измерительных систем для наземных методов индуктивной электроразведки. Отбор и передача информации. – К.: Наукова думка, 1970. – Вып. 26. – С. 49–58. 6. Бучма І. М. Метод аероелектророзвідки провідних магнітних руд. Інформаційні технології і системи. – 2001. – № 1–2. – С. 115–122. 7. Бучма І. М., Репетило Т. М., Ферчук К. В. Засоби вихрострумової діагностики корозійного стану сталевих листових конструкцій. – Львів: Вид-во “Львівська політехніка”, 2015. – 291 с.

УДК 681.335 (088.8)

З. Р. Мичуда<sup>1,3</sup>, Л. З. Мичуда<sup>2</sup>, У. С. Антонів<sup>1</sup>  
Національний університет “Львівська політехніка”,  
<sup>1</sup>кафедра комп’ютеризованих систем автоматики,  
<sup>2</sup>кафедра автоматизації теплових і хімічних процесів;  
<sup>3</sup>Політехніка Сьвентокшиська в Кельцах (Польща)

## ЛОГАРИФМІЧНІ АЦП З НАКОПИЧЕННЯМ ЗАРЯДУ НА ПОСЛІДОВНИХ ПАСИВНИХ КОНДЕНСАТОРНИХ КОМІРКАХ. ЧАСТИНА 2

© Мичуда З. Р., Мичуда Л. З., Антонів У. С., 2017

**Запропоновано математичні моделі похибок логарифмічних АЦП з накопиченням заряду на послідовних пасивних конденсаторних комірках, наведено результати моделювання та дано оцінку точності.**

**Ключові слова:** логарифмічні АЦП, комутовані конденсатори, накопичення заряду, моделювання, точність.

**The mathematical models of errors of logarithmic ADC, based on accumulation of a charge in serial passiv condensers cells are offered, the results of modelling are presented and the valuation of accuracy are given.**

**Keywords:** logarithmic ADC’s, switched capacitors, charge accumulation, modeling, accuracy.

### Моделювання впливу струмів витікання в ЛАЦП з накопиченням заряду на послідовній пасивній конденсаторній комірці

Модель ЛАЦП з накопиченням заряду на пасивних послідовних конденсаторних комірках, яка враховує вплив струмів витікання елементів схеми, наведено на рис. 1.

У цій моделі відобразимо те, що вона змінюється відповідно до змін структури ЛАЦП в окремих фазах перетворення (Ф1-Ф4), кожна з яких визначатиме вигляд моделі ЛАЦП:

Ф1) накопичення заряду конденсатором  $C_n$ , що відбувається при розімкнутих ключах К0, К3, К4 і замкнених ключах К1, К2;

Ф2) перша пауза, при якій розімкнуті всі ключі, К0-К4;

Ф3) розряд дозуючого конденсатора  $C_d$ , що відбувається при розімкнутих ключах К0, К1, К2 і замкнених ключах К3, К4;

Ф4) друга пауза, при якій розімкнено всі ключі, К0-К4.