

І. М. Бучма

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра комп’ютеризованих систем автоматики

## ВИХРОСТРУМОВИЙ МЕТОД ТА СТРУКТУРА АПАРАТНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ ПОШУКУ ЛОКАЛЬНИХ ПРОВІДНИХ ТІЛ У ЗОНІ АВТОШЛЯХОПРОВОДУ

© Бучма І. М., 2019

Часто в зоні шляхопроводу (під дорожнім покриттям, а частіше під узбіччям) можуть знаходитися провідні тіла з діамагнітними або феромагнітними властивостями, що можуть становити певну цінність або загрозу, наприклад, для транспортних засобів. Тому вчасне виявлення та утилізація таких тіл є важливими. Розглянуто використання вихрострумowego методу для пошуку таких тіл. Показано, що алгоритм дій при виявленні тіл з діамагнітними властивостями відрізняється від алгоритму дій при виявленні тіл з феромагнітними властивостями, а апаратні засоби виявлення використовують ті самі в обох випадках.

**Ключові слова:** вимірювання відносних значень, первинне магнітне поле, вторинне магнітне поле, квадратурна складова, статична модель системи збудник-приймач та провідне тіло, динамічна модель системи збудник-приймач та провідне тіло, форма сигналу динамічної моделі.

Often, conducting things with diamagnetic or ferromagnetic properties may be present in the overpass area (under the road or under the sidelines), which may be of particular value or threat, for example, to vehicles. Therefore, timely detection and disposal of such bodies are important. The article discusses the use of the eddy current method to search for such bodies. It is shown that the algorithm for detecting bodies with diamagnetic properties is different from the algorithm for detecting bodies with ferromagnetic properties, and the hardware for detecting them is used in both cases.

**Keywords:** measurement of relative values, primary magnetic field, secondary magnetic field, quadrature component, static model of the exciter-receiver system and conductor body, dynamic model of the exciter-receiver system and conductor body, signal shape of the dynamic model.

### Вступ

Виявлення локальних провідних тіл під полотном автомобільного шляхопроводу (зокрема, ґрунтового) або неподалік від шляхопроводу на його узбіччі (і асфальтованого також) може мати велике значення для безпеки рухомого транспорту. З огляду на значну протяжність шляхопроводів мобільність пошукових засобів повинна бути дуже високою. Високою мобільністю характеризуються вихрострумові засоби, які можна розташовувати на рухомих та легких платформах, зокрема на таких як літак [1], безпілотний літальний апарат [2] або легкий рухомий транспорт типу квадроциклу [3]. Хороший результат щодо мобільності можна отримати, використовуючи індуктивний вихрострумний метод гармонічно змінними електромагнітними полями.

### Огляд літературних джерел

При пошуку тіл з діамагнітними властивостями вихрострумним методом використовують аероелектророзвідувальні системи за методом низькочастотних гармонічних електромагнітних полів. Використовують як системи, що можуть розташовуватися на борту легких літаків, таких як

АН-2 [4], так і наземні переносні системи [5]. Їх робота базується на статичній моделі системи збудник- приймач поля та провідне феромагнітне тіло.

Донедавна пошук тіл з феромагнітними властивостями базувався тільки на вимірюванні аномалій постійного магнітного поля [4]. А для одночасного пошуку тіл з діамагнітними та феромагнітними тілами використовували двоканальні засоби з електророзвідувальним та магнітним каналами [4]. Труднощі у використанні таких засобів полягають в тому, що їх одночасна робота часто є неможливою, оскільки такі канали створюють завади один одному.

Нові можливості використання вихрострумів засобів з'явилися тоді, коли було створено вихроструміву динамічну модель взаємодії системи збудник- приймач поля та провідне тіло [6]. Згідно з цією моделлю рухомі вихроструміві засоби здатні виявляти тіла з феромагнітними властивостями.

### Мета і задачі статті

Метою статті є обґрунтування теоретичних засад створення вихрострумівих засобів, здатних виявляти тіла як з діамагнітними, так і з феромагнітними властивостями, що можуть бути закладені в зоні автомобільного шляхопроводу.

В основу цього обґрунтування покладено обидві моделі системи збудник – приймач поля та провідне тіло, тобто статична та динамічна моделі.

Відомо, що за статичною моделлю виявлення тіл з діамагнітними властивостями здійснюється при вимірюванні відносних значень квадратурної складової вторинного магнітного поля до магнітної складової первинного магнітного поля, або відношення півосей еліпса поляризації сумарного магнітного поля, або ж фазового зсуву між вектором напруженості первинного магнітного поля та вектором напруженості сумарного поля. При переміщенні рухомої системи діамагнітне тіло виявляють за максимальним значенням аномального сигналу.

Динамічна ж модель пов'язує появу у вихрострумівій системі, що рухається з достатньою швидкістю (близько 40 км/год і більше), сигналу у вигляді одного періода синусоїди з наявністю тіла з феромагнітними властивостями.

Отже, використавши цю ідею, можна однією і тією самою вихрострумівою системою здійснювати пошук локальних тіл у зоні, зокрема, і автомобільного шляхопроводу.

### Виклад основного матеріалу

Вихроструміву систему, яку можна за певної видозміни використати для виявлення провідних тіл в зоні полотна автомобільного шляхопроводу (рис.1), відома давно, розроблена автором і практично використовувалася в наземному варіанті для пошуку діамагнітних рудних родовищ [5]. Така система складається з суміщених та ізольованих між собою генераторної ГП та вимірювальної ВП провідних петель однакових розмірів, виконаних у вигляді багатовиткового навою, жорсткого ізоляційного каркаса К у вигляді квадрата чи прямокутника певних розмірів, по периметру якого виконано паз, в якому розміщено багатовитковий навій з генераторної ГП та вимірювальної ВП петель.

До системи входить генератор(Г) синусоїдальної напруги (струму), варіометр (В), вимірювальний пристрій (ВМ) одного з трьох 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, або відношення півосей еліпса поляризації магнітного поля, реєстратор (Р) результатів вимірювання, реєстратор положення GPS та рухома платформа (РП).

Тут жорсткий ізоляційний каркас К монтується навколо платформи РП або за її межами, наприклад, перед нею, і своєю шириною він перебиває шляхопровід або навіть частину узбіччя, а решту елементів системи встановлено на самій платформі РП, яка рухається вздовж шляхопроводу.

Генератор Г живить синусоїдальним струмом послідовно з'єднані первинний навій варіометра В та генераторну петлю ГП, розміщену у жорсткому ізоляційному каркасі К, прикріпленому

до рухомої платформи РП. Синусоїдальний струм струм генераторної петлі ГП створює у навколишньому просторі змінне електромагнітне поле, яке, поширюючись, проникає з повітря у досліджуваний малопровідний напівпростір (землю, тобто, ґрунт) і, зустрічаючи на своєму шляху провідні тіла, індукує в них вихорові струми. Ці струми створюють вторинне електромагнітне поле, магнітна складова якого додається до магнітної складової первинного поля, зсуваючи сумарне магнітне поле за фазою. Це сумарне магнітне поле наводить ЕРС у вимірювальній петлі ВП, яку разом з генераторною петлею ГП розміщено у жорсткому ізоляційному каркасі К.

Реакція системи на тіло з діамагнітними властивостями добре відома та описана, наприклад, у роботах [4, 5]. Тому на цьому тут зупинятися не будемо.

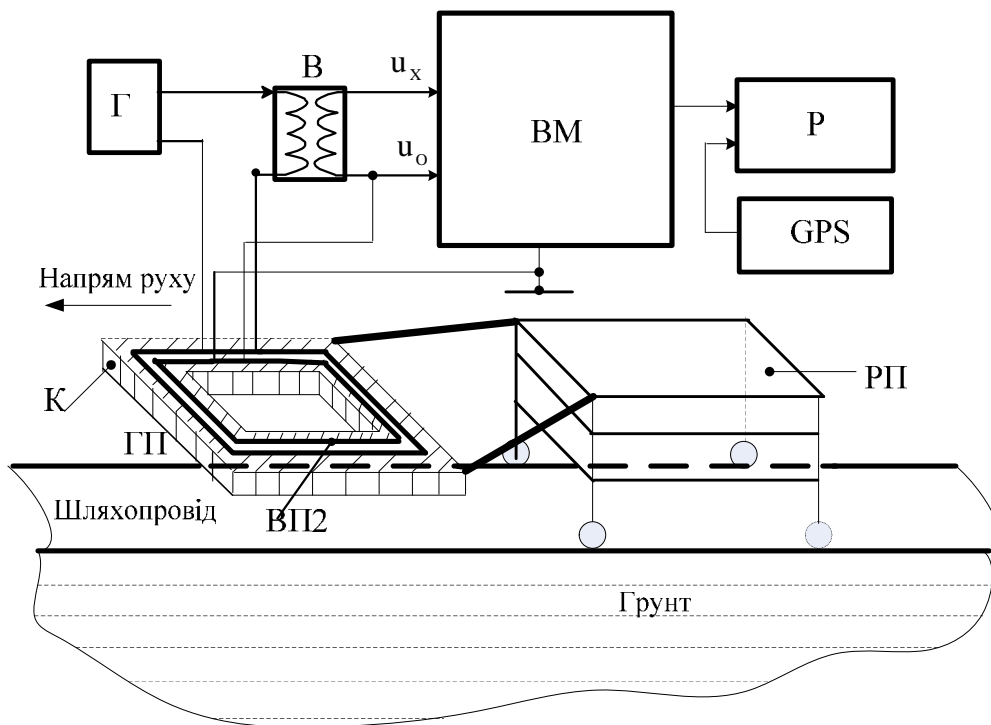


Рис. 1. Структурна схема вихрострумної системи для пошуку провідних тіл у зоні автомобільного шляхопроводу

Розглянемо, якою буде реакція системи для виявлення провідних тіл, якщо в зоні шляхопроводу буде знаходитися провідне тіло з феромагнітними властивостями. Для спрощення будемо вважати, що в площині приймання, зокрема 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 (така ситуація виникає за наявності локального тіла з феромагнітними властивостями), напрям у просторі напруженості вторинного магнітного поля в площині приймання, зокрема, в середині вимірювальної петлі ВП лежить на лінії, що з'єднує її центр з центром тіла з феромагнітними властивостями. А напрям напруженості первинного поля перпендикулярний до площини генераторної петлі ГП та вимірювальної петлі ВП (рис. 2). Тоді для вертикальної складової напруженості вторинного магнітного поля в площині приймання, враховуючи горизонтальний рух пристрою для виявлення провідних тіл в зоні шляхопроводу, можна записати

$$H_{2y}(t) = H_{2m} \times \sin \omega t \times \sin \alpha(t) = H_{2m} \times \sin \omega t \times \sin \left( \arctg \frac{h}{-L_{ПОР} + vt} \right), \quad (1)$$

де  $H_{2m}$  – амплітуда складової вторинного магнітного поля;  $\alpha(t) = \arctg \frac{h}{l_x(t)} = \arctg \frac{h}{-L_{ПОР} + vt}$  – змінний у часі кут між горизонтальною лінією руху та напрямком на провідне тіло з

феромагнітними властивостями;  $h$  – висота руху генераторної ГП та вимірювальної ВП петель над досліджуваним шляхопроводом (земля, тобто, ґрунт);  $l_x(t) = -L_{\text{ПОР}} + vt$  – проекція відстані між центром вимірювальної петлі ВП та провідним тілом на горизонтальну лінію, що збігається з напрямком руху пристрою для виявлення провідних тіл у зоні шляхопроводу;  $v$  – швидкість руху каркаса К з генераторною ГП та вимірювальною ВП петлями, переміщуваного рухомою платформою РП у горизонтальній площині.

На основі (1) запишемо вираз для ЕРС у вимірювальній петлі ВП, наведену вторинним магнітним полем

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

$$= - WSH_{2m} \left\{ \cos \omega t \times \omega \times \sin(\arctg \frac{h}{-L_{\text{ПОР}} + vt}) + \sin \omega t \times \frac{d}{dt} \left( \frac{\dot{\epsilon}}{\epsilon} \sin(\arctg \frac{h}{-L_{\text{ПОР}} + vt}) \right) \right\} \quad (2)$$

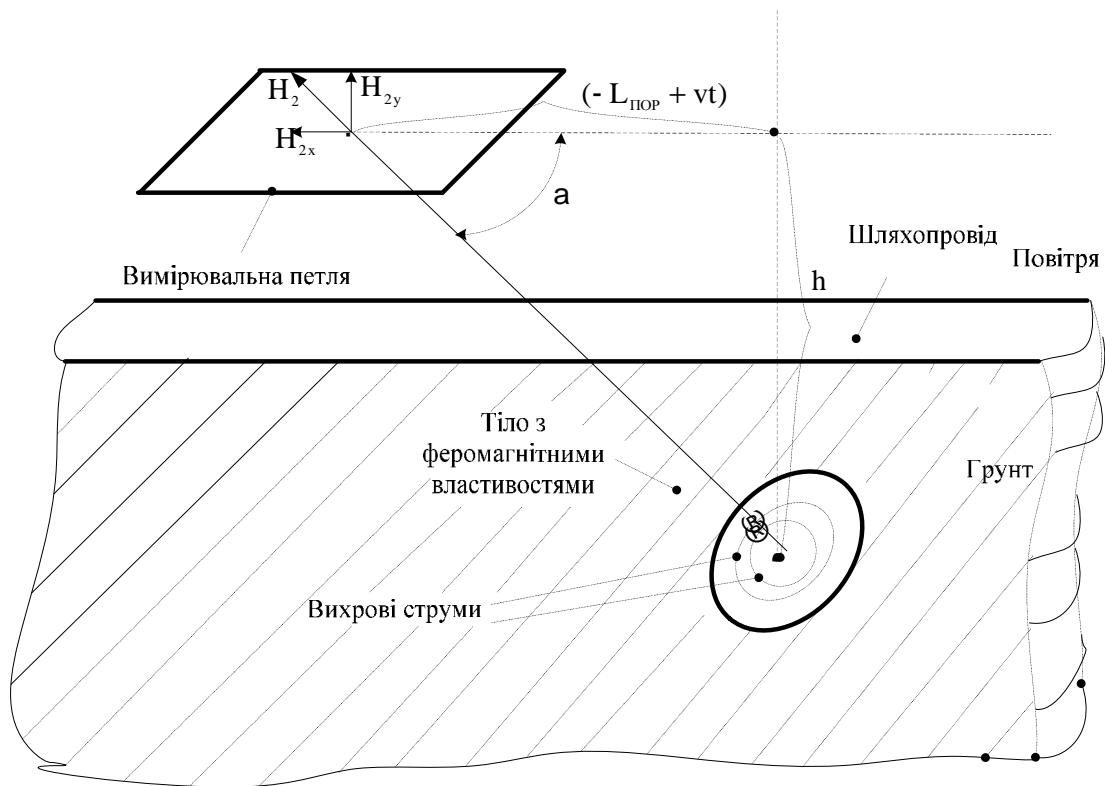


Рис. 2. Вимірювальна петля над шляхопроводом, під яким закладено феромагнітне тіло

Перший член в останньому виразі – це квадратурна складова, яка виникає у вимірювальній петлі ВП із синфазної складової при диференціюванні магнітного потоку вимірювальною петлею ВП. Ця квадратурна складова буде вимірюватися вимірювальним пристроєм ВМ, а її відліки будуть реєструватися реєстратором Р. Поява квадратурної складової в сигналі вторинного магнітного поля зумовить фазовий зсув між сигналами первинного та сумарного полів, тому вимірювальний пристрій ВМ може вимірювати також і фазовий зсув, відліки якого будуть реєструватися реєстратором Р або може вимірювати відношення півосей еліпса поляризації магнітного поля. Також реєстратор Р буде синхронно реєструвати відліки координат місцезнаходження рухомої платформи РП, які надходять від реєстратора GPS.

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

На підставі виразу (2) випишемо залежність, що описує поведінку тільки квадратурної складової

$$e_{кBy} = -wWSH_{2m} \cos wt \times \sin(\arctg \frac{h}{-L_{ПОР} + vt}) =$$

$$= wWSH_{2m} \cos wt \times \sin(\arctg \frac{h}{L_{ПОР} - vt}) \quad (3)$$

Користуючись виразом (3) (рис. 3), розглянемо окремо чотири випадки:

а) при наближенні пошукової системи до тіла, тобто при  $vt \ll L_{ПОР}$  ;  $h \ll L_{ПОР}$  . Тоді вираз для квадратурної складової матиме вигляд

$$e_{кBy} = wWSH_{2m} \times \frac{h}{L_{ПОР} - vt} \times \cos wt . \quad (4)$$

З виразу (4) видно, що в міру наближення пошукової системи до феромагнітного тіла значення квадратурної складової зростатиме за рахунок зменшення знаменника дробової частини виразу;

б) при приближенні до тіла, коли для моменту часу  $t_1$  справедливий вираз, що  $L_{ПОР} - vt_1 = 0^+$  , то згідно з (4) квадратурна складова прямує до свого максимуму, оскільки  $\frac{h}{L_{ПОР} - vt_1} \rightarrow \infty$  , а  $\sin(\arctg \frac{h}{L_{ПОР} - vt}) \rightarrow 1$  ;

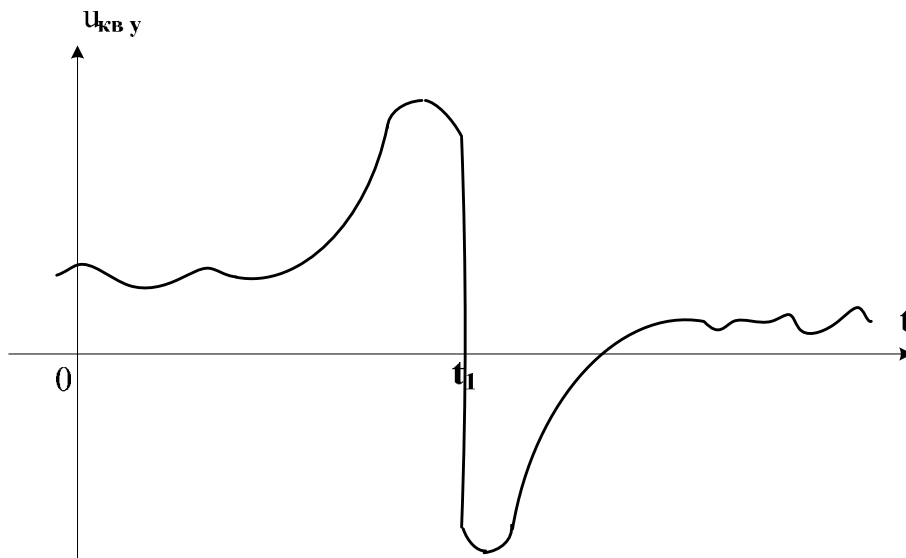


Рис. 3. Форма сигналу від феромагнітного тіла

в) в момент віддалення від тіла, коли для моменту часу  $t_1$  справедливий вираз, що  $L_{ПОР} - vt_1 = 0^-$  , квадратурна складова різко змінює знак, набуваючи свого від'ємного максимуму, тому що

$$\sin(\arctg \frac{h}{L_{ПОР} - vt}) \rightarrow -1 ;$$

г) при подальшому віддаленні від тіла, тобто при зростанні модуля  $|L_{ПОР} - vt|$  , згідно з виразом

$$e_{кBy} = -wWSH_{2m} \times \sin(\arctg \frac{h}{L_{ПОР} - vt}) \times \cos wt$$

від'ємне значення квадратурної складової зменшується аж до рівня, меншого від порогового.

Сказане відображено на рис.3.

За моментом переходу синусоїдально подібної частини сигналу через нульовий рівень, координати, які фіксує реєстратор GPS, відповідають перерізу шляхопроводу, в якому знаходиться провідне феромагнітне тіло.

### Висновки

Отже, використовувати пошукову систему для виявлення провідних тіл з феромагнітними властивостями в зоні шляхопроводу необхідно в процесі руху. З практичного досвіду можна рекомендувати швидкість руху 30–60 км/год.

Фіксуючи координати пошукової системи в момент переходу сигналу у вигляді одного періоду синусоїди через нуль, можна визначити переріз шляхопроводу та узбіччя, в якому знаходиться тіло з феромагнітними властивостями.

Виявляти тіла з діамагнітними властивостями можна при русі також і з меншими швидкостями, наприклад, 3–5 км/год. При цьому координати місця залягання провідного тіла знаходять за максимальним значенням сигналу, тобто, як звичайно у таких системах.

### Список літератури

1. Мизюк Л. Я., Поджарый В. М., Проць Р. В. *Измерение инвариантов магнитного поля при электроразведке*. К.: Наукова думка, 1976. 231 с.
2. Патент на корисну модель № 118669 UA, Україна. МПК G01V 3/16 (2006.01) Пристрій для аероелектророзвідки / Бучма І. М., Мельник А. О. (Україна). № заявки у 2017 12964, Заявл. 19.12.2016, Опубл. 28.08.2017. Бюл. № 16, 2017. 7 с.
3. Патент на корисну модель № 134375 UA Україна, МПК G01V 3/16 (2006.01) Пристрій для виявлення локальних провідних тіл в зоні полотна цляхопроводу / Бучма І. М., (Україна). № Заявки: u201812744; Заявлено 21.12.2018; Опубл. 10.05.2019, Бюл. № 9, 2018. 7 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. Бучма І.М. Засоби вимірювання індуктивної електророзвідки та вихрострумової діагностики. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту “Львівська політехніка”, 2008. 294 с.
6. Бучма І. М. Метод аероелектророзвідки провідних магнітних руд // Інформаційні технології і системи. № 1–2. 2001. С. 115–122.

### Reference

1. Mizyuk L. Ya., Podzharyiy V. M., Prots R. V. *Izmerenie invariantov magnitnogo polya pri elektrorazvedke*. Kiev : Naukova dumka, 1976. 231 s.
2. Patent na korysnu model No. 118669 UA, Ukraina. MPK G01V 3/16 (2006.01) Prystrii dlia aeroelektrozvidky / Buchma I. M., Melnyk A. O. (Ukraina). No. zaiavky u 2017 12964, Zaiavl. 19.12.2016, Opubl. 28.08.2017. Biul. No. 16, 2017. 7 s.
3. Patent na korysnu model No. 134375 UA Ukraina, MPK G01V 3/16 (2006.01) Prystrii dlia vyivlennia lokalnykh providnykh til v zoni polotna shchliakhoprovodu / Buchma I. M., (Ukraina). No. Zaiavky: u201812744; Zaiavleno 21.12.2018; Opubl. 10.05.2019, Biul. No. 9, 2018. 7 s.
4. Apparatura dlya aergeofizicheskoy razvedki s magnitnyim i elektromagnitnyim informatsionnyimi kanalami / A. A. Vakul'skiy, L. Ya. Mizyuk, R. V. Prots, Yu. Yu. Sikachevskiy; Pod red. L. Ya. Mizyuka. K.: Naukova dumka, 1985. 253 s.
5. Buchma I.M. Zasoby vymiriuvannia induktyvnoi elektrorozvidky ta vykhrostrumovoi diahnostyky. Lviv: Vyd-vo NU “Lvivska politekhnikha”, 2008. 294 s.
6. Buchma I.M. Metod aeroelektrozvidky providnykh mahnitnykh rud. Informatsiini tekhnolohii i systemy. No. 1-2, 2001. S. 115–122.