

# МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

УДК 621.317.44

## ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ МАРКЕРНІ СИСТЕМИ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО ПОШУКУ ПІДЗЕМНИХ КОМУНІКАЦІЙ ТА ВИЯВЛЕННЯ ЇХ ФУНКЦІОНАЛЬНО ВАЖЛИВИХ ЕЛЕМЕНТІВ

© Драбич О. П., Драбич П. П., 2002

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, м. Львів

© Кичма А. О., 2002

Національний університет "Львівська політехніка"

© Коваль Р. І., 2002

Філія управління магістральних газопроводів "Львівтрансгаз"

**Описані структурні схеми імпульсних електромагнітних маркерних систем для визначення напрямку залягання підземних протяжних струмопровідних комунікацій та оперативного виявлення їх функціонально важливих елементів.**

У зв'язку з неперервним збільшенням кількості підземних інженерних комунікацій і разом з ними різних з'єднувальних і перехідних пристроїв та розгалужень очевидною є проблема створення ефективних та надійних в експлуатації технічних засобів для швидкої локалізації певного елемента, місця чи відрізка комунікації, які виконують в даній системі важливі функції. Для вирішення цієї задачі одним з найбільш розповсюджених на даний час є метод імпульсного електромагнітного зондування. Суть цього полягає в тому, що в контрольованих точках підземних інженерних комунікацій розміщуються спеціальні помітки або маркери, які є коливними контурами. Для локалізації маркерів використовуються прилади, які налаштовані на резонансну частоту цих маркерів. Після опромінення кожним електромагнітним імпульсом маркер починає генерувати в паузі між збуджуючими імпульсами зникаючі коливання, які фіксуються приймальним перетворювачем і є інформацією про наявність в ґрунті певного маркера.

Під час пошуку і обстеження комунікацій одночасно з інформативним сигналом на приймальний перетворювач діють електромагнітні завади, які зменшують глибинність виявлення маркерів.

З метою підвищення ефективності електромагнітних маркерних систем здійснювалось математичне і фізичне моделювання реальних сигналів з метою виявлення їх найбільш завадостійких параметрів, а також синтез і аналіз завадостійких технічних засобів для їх оцінювання.

Результати досліджень по визначенню завадостійких параметрів в сигналах технічних пошукових систем, а також результати математичного моделювання, синтезу і аналізу усереднюючих обчислюва-

льних перетворювачів оцінок параметрів вимірювальних сигналів знайшли ефективне застосування в електромагнітних пошуково-вимірювальних системах, зокрема, в розроблених в ФМІ ім. Г.В.Карпенка НАН України електромагнітних маркерних системах МС-1...МС-3 [1, 2], для виявлення закопаних в ґрунті над функціонально важливими вузлами підземних комунікацій електромагнітних маркерів, та в їх наступних модифікаціях з розширеними функціональними можливостями, наприклад, в пристрої, описаному в [3].

Структурна схема електромагнітної маркерної системи МС-3 показана на рис. 1.

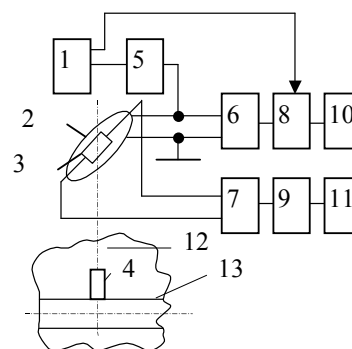


Рис. 1. Електромагнітна маркерна система МС-3

Вона складається з формувача імпульсів керування 1, випромінювано-приймальної рамки 2 з вертикальною віссю чутливості та приймальної індукційної котушки 3 з горизонтальною віссю чутливості, електромагнітного маркера 4 у вигляді LC-контур, генератора імпульсів струму 5, смугових підсилювачів 6 і 7, усереднюючих перетворювачів 8 і 9, перетворювача постійної напруги в звуковий

сигнал 10 та аналогового індикатора 11.

Маркерна система МС-3 здійснює пошук осі комунікації, швидку локалізацію її функціонально важливих елементів чи відрізків, а також точну прив'язку вздовж осі даних внутрітрубного обстеження магістральних трубопроводів або обстежень з поверхні ґрунту і працює наступним чином.

Нехай по закопаній в ґрунт 12 комунікації (трубопроводі) 13 протікає змінний електричний струм  $I(t)$  з частотою  $f$ . Тоді в розміщеній в горизонтальній площині перпендикулярно до осі трубопроводу котушці 3 під дією горизонтальної складової напруженості  $H_1(t)$  наводиться е.р.с.

$$e_1(t) = \mu_0 \mu_T f W S \frac{I(t)}{h}. \quad (1)$$

Ця е.р.с. підсилюється смуговим підсилювачем 7 і подається на вхід усереднюючого перетворювача 9, який здійснює вагове усереднення випадкових амплітудних значень напруги  $e_1(t)$ , зумовлених зовнішніми завадами і шумами вихідного підсилювача 7. Вихідний сигнал перетворювача 9 реєструється аналоговим індикатором, а за його максимальним значенням визначається вісь трубопроводу.

Одночасно з визначенням осі трубопроводу здійснюється пошук закопанних над ним маркерів. Цей пошук відбувається наступним чином.

При поданні з виходу генератора 5 імпульсів струму в випромінювально-приймальну рамку 2 остання випромінює в навколишнє середовище імпульсне електромагнітне поле. Під дією кожного випромінюваного імпульсу електромагнітного поля котушці маркера 4 надається магнітна енергія і в маркері виникають зникаючі електромагнітні коливання, які випромінюються в паузах між збуджуючими імпульсами струму в навколишнє середовище і реєструються випромінювально-приймальною рамкою 2. Імпульси напруги підсилюються підсилювачем 6 і поступають на вхід перетворювача 8, керуваного сигналом з виходу формувача 1. Під дією імпульсу керування тривалістю  $T_1$ , затриманого відносно моменту закінчення зондувального імпульсу електромагнітного поля, в перетворювачі 8 здійснюється накопичення максимальних значень  $r$ -го коливного процесу ( $r \in Z = 0, 1, 2, 3, \dots$ ).

Алгоритм роботи усереднюючого перетворювача 8 описується неоднорідним лінійним різнице-вим рівнянням, тобто

$$\Delta U_r = a \sum_{i=1}^m A_i - b U(r) = a A_{\Sigma r} - b U(r), \quad (2)$$

де  $\Delta U_r$  - зміна вихідної напруги  $U(r)$  перетворювача після дії  $i$ -го зондувального імпульсу;  $a$  і  $b$  - постійні коефіцієнти;  $m = T_1 f_0$ ;  $f_0$  - резонансна частота маркера;  $A_i$  -  $i$ -е амплітудне значення  $r$ -го

відеоімпульсу в  $t_{ri}$ -ий момент часу, причому  $A_{ir} = A_0 \exp(-\alpha t_{ir})$ ,  $A_0$  - максимальне (при  $i=1$ ) амплітудне значення  $r$ -ї послідовності;  $A_{\Sigma r} = \sum_{i=1}^m A_i$ .

Величина  $A_{\Sigma r}$  за рахунок шумової складової сигналу приймає випадкові значення, тобто послідовність  $\{A_{\Sigma r}\}$  є випадковим процесом.

Розв'язок (2) для середніх значень  $\hat{A}$ , величини  $A_{\Sigma r}$  та  $\hat{U}(r)$  при початковій умові  $U(0) = U_0$  має вигляд:

$$\hat{U}(r) = K_0 \hat{A} [1 - W(r)] + U_0 W(r), \quad (3)$$

де  $K_0 = \frac{a}{b}$  - масштабний коефіцієнт перетворення

$\hat{A}$  в постійну напругу  $\hat{U}(r)$ ;  $W(i) = (1+b)^{-i}$  - вагова функція, що характеризує швидкість зміни вихідної напруги  $\hat{U}(r)$  в залежності від аргументу  $r$ .

Після закінчення перехідного процесу ( $r \gg 1$ ) вагова функція  $W(r) \rightarrow 0$ , буде такою:

$$\hat{U}(\infty) = K_0 \hat{A}, \quad (4)$$

тобто вихідна напруга усереднюючого перетворювача 8 в усталеному режимі є лінійною функцією від середнього значення  $\hat{A}$  суми амплітуд  $A_{ir}$  на інтервалі часу  $T_1$  при фіксованій відстані між котушкою 2 та маркером 4.

Представлена на рис. 1 електромагнітна маркерна система не дозволяє ідентифікувати закопані маркери по частоті, що звужує область її застосування.

Для розширення функціональних можливостей розроблених маркерних систем запропонована структурна схема пристрою [3], представленому на рис. 2, де також показані закопані в ґрунт електромагнітні маркери.

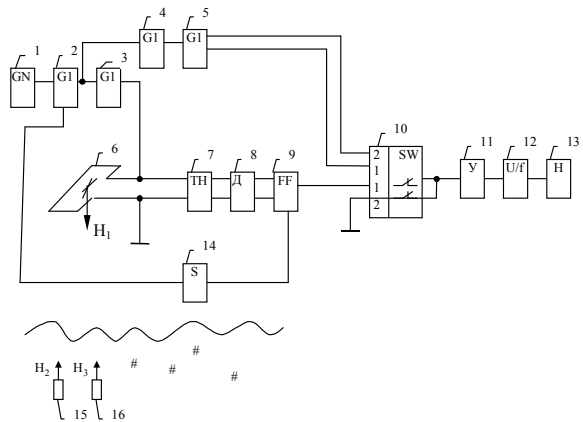


Рис. 2. Пристрій для виявлення та ідентифікації електромагнітних маркерів

Пристрій складається з задаючого генератора 1, регульованого одновібратора 2, генератора імпульсів струму 3, першого і другого одновідбаторів 4 і 5, випромінювально-приймальної індуктивної рамки 6, двостороннього обмежувача 7, попереднього і вузькосмугового підсилювачів напруги 8 і 9, двоканального комутатора аналогових сигналів 10, усереднюючого перетворювача імпульсних сигналів 11, перетворювача напруги в частоту 12, індикатора 13 і перемикача 14. На рисунку також показані два закопані в ґрунт електромагнітні маркери: 15 - пошуковий і 16 - ідентифікаційний. Резонансні частоти маркерів різні.

Принцип дії пристрою полягає в наступному. Задаючий генератор 1 виробляє послідовність прямокутних імпульсів, які своїми задніми фронтами запускають регульований одновібратор 2, який на своєму виході формує послідовність прямокутних імпульсів з заданою тривалістю  $t_j$ . Під дією цих імпульсів з генератора імпульсів струму 3 в індуктивну випромінювально-приймальну рамку 6 подається послідовність імпульсів струму довжиною  $t_j$ . Під дією цих імпульсів струму навколо рамки 6 утворюється електромагнітне поле напруженістю  $H_1$  у вигляді імпульсів прямокутної форми тривалістю  $t_j$ . За рахунок імпульсів цього поля у маркерах 15 і 16 виникають зникаючі електромагнітні коливання на їх власних резонансних частотах  $f_{01}$  і  $f_{02}$  ( $f_{01}$  - для маркера 15 і  $f_{02}$  - для маркера 16), тобто навколо маркера 15 виникає електромагнітне поле з напруженістю  $H_2$ , а навколо маркера 16 - з напруженістю  $H_3$ . Амплітуда імпульсів цього поля прямо пропорційна до амплітуд струмів у котушках індуктивності цих маркерів і залежить від тривалості імпульсів первинного збуджуючого поля.

Формула зміни струму у коливному колі маркера, наприклад, пошукового маркера 15, який індуктивно зв'язаний з випромінювально-приймальною рамкою 6, на яку в момент  $t = 0$  подається наруга  $U$ , має такий вигляд [4]

$$I_1(t)_{15} = -\frac{MU}{\sigma_{15}L_6L_{15}\omega_{01}} e^{-b_{15}t} \sin\omega_{01}t = -I_{m15}e^{-b_{15}t} \sin\omega_{01}t, (5)$$

де  $L_6, L_{15}$  - індуктивності маркера 15 і випромінювально-приймальної рамки 6;  $M$  - коефіцієнт взаємодування;  $\sigma_{15} = 1 - k_{15}^2$  - коефіцієнт розсіювання;  $k = \frac{M}{\sqrt{L_6L_{15}}}$  - коефіцієнт зв'язку;  $b_{15} = \frac{R_{15}}{2L_{15}}$  - коефіцієнт зникання контуру маркера 15;  $R_{15}$  - активний опір індуктивності маркера 15;  $I_{m15}$  - амплітуда струму в коливному колі маркера 15;  $\omega_{01} = 2\pi f_{01}$  -

кругова частота власних коливань в контурі маркера 15.

Якщо тепер через час  $t_j$  випромінювально-приймальну рамку відімкнути від джерела напруги  $U$ , то для  $t > t_j$  струм  $I(t)_{15}$  буде змінюватися наступним чином:

$$I_{15}(t) = -I_{m15}e^{-b_{15}t} \sin\omega_{01}t + I_{m15}e^{-b_{15}(t_j+t)} \sin\omega_{01}(t_j+t) = -I_{m15}e^{-b_{15}t} [\sin\omega_{01}t + e^{-b_{15}t_j} \sin\omega_{01}(t_j+t)] (6)$$

Враховуючи, що для отримання по можливості тривалішого перехідного процесу в коливних колах маркерів, вони виконуються так, щоб їх коефіцієнти зникання були малими ( $b_{15}t_j = 1$ ), тобто  $e^{-b_{15}t_j} \approx 1$ .

Струм в колі маркера 15 описується виразом:

$$I_{15}(t) = -I_{m15}e^{-b_{15}t} \left[ \sin\omega_{01}t + e^{-b_{15}t_j} \sin\omega_{01}(t_j+t) \right] = -2I_{m15}e^{b_{15}t} \cos\omega_{01}\left(t_j + \frac{t_j}{2}\right) \sin\frac{\omega_{01}t_j}{2}. (7)$$

Максимальне значення струм буде мати при  $\sin\frac{\omega_{01}t_j}{2} = 1$ , тобто коли  $\frac{\omega_{01}t_j}{2} = \left(k + \frac{1}{2}\right)\pi$ , або при  $t_j = \left(k + \frac{1}{2}\right) \frac{1}{f_{01}}$ , де  $k = 0, 1, 2, \dots$

При  $t_j = \frac{k}{f_{01}}$  - перехідний процес після закінчення імпульсу струму фактично відсутній. Він виникає тільки за рахунок зникання струму в колі маркера за час  $t_j$  і непрямокутності імпульсу струму в випромінювально-приймальній рамці.

Проведений аналіз дозволяє встановити оптимальний зв'язок між частотою власних коливань контуру будь-якого маркера  $f_0$  і тривалістю імпульсу струму в випромінювально-приймальній рамці.

Він має вигляд  $f_0 = \left(k + \frac{1}{2}\right) \frac{1}{t_j}$ , або  $t_j = \left(k + \frac{1}{2}\right) \frac{1}{f_0}$ , де  $k = 0, 1, 2, \dots$

Оскільки при довготривалих імпульсах струму відбувається зайва витрата електроенергії, то найкраще приймати  $k = 1$  і  $t_j = \frac{1}{2f_0}$ . Але тоді можливі

випадки, коли за такий час струм в випромінювально-приймальній рамці не встигне прийняти сталі значення і виникає необхідність прийняти  $k \geq 2$ .

Наведена вторинними полями обох маркерів 15 і 16 на випромінювально-приймальній рамці 6 е.р.с. подається на двосторонній обмежувач 7, який служить для обмеження на рівні 1...2 В імпульсів напруги самоіндукції рамки 6, що виникають при приєднанні її генератором імпульсів струму до джерела

напруги  $U$ . В реальних умовах ці імпульси самоіндукції мають амплітуду до 300...500 В.

З виходу обмежувача сигнал через послідовно з'єднані попередній і вузькосмуговий підсилювачі напруги 8 і 9 подаються на об'єднані входи двоканального комутатора 10. Резонансна частота вузькосмугового підсилювача напруги 9 встановлюється перемикачем 14 такою, що відповідає вимозі

$$f_0 = \left(k + \frac{1}{2}\right) \frac{1}{t_j}$$

Керування роботою комутатора 10 здійснюється так, що перемикач елементів, що забезпечують тривалість імпульсів струму  $t_j$  резонансної частоти  $f_0$  відбувається одночасно і передбачена рівність виконується завжди.

Керування роботою комутатора 10 здійснюється за допомогою одновібраторів 4 і 5. Одновібратор 4 служить для формування імпульсу затримки, який утворюється після закінчення імпульсу струму. Заднім фронтом цього імпульсу затримки запускається другий одновібратор 5, який і формує імпульс керування ключем 10. Під впливом імпульсів з прямого і інверсного виходів цього одновібратора ключ 10 пропускає через себе сигнал з виходу вузькосмугового підсилювача напруги 9 до входу усереднюючого перетворювача імпульсів 11. Решта часу вихід підсилювача 9 через ключ 10 заземлений. Затримка одновібратором 4 вводиться на час дії напруги самоіндукції, а час поступлення сигналу на вхід усереднюючого перетворювача імпульсів визначається часом, коли інформативна складова сигналу (зникаючі коливання) на виході вузькосмугового підсилювача 9 більша або рівна шумовій складовій.

На виході усереднюючого перетворювача імпульсних сигналів 11 виробляється постійна напруга, пропорційна до середнього значення суми заданого числа амплітуд коливань напруги на виході вузькосмугового підсилювача 9 за час його з'єднання двоканальним комутатором 10 із входом усереднюючого перетворювача. Постійна напруга потім перетворюється в сигнал із змінною частотою за допомогою перетворювача напруги в частоту 12 і реєструється індикатором 13, наприклад, головним телефоном.

Спосіб застосування пристрою заснований на можливості відрізнити частоту збудження ідентифікаційних маркерів і, тим самим, знайти потрібний серед інших. Спосіб виявлення пошукових маркерів не відрізняється від способу використаному в маркерній системі МС-3.

Рекомендованим способом використання пристрою може бути наступний. В ґрунті закопують поруч два маркери - пошуковий з частотою власних

коливань  $f_{01}$  і ідентифікаційний з частотою  $f_{02}$ .

При пошуку місця розташування маркерів перемикач 14 ставиться в перше положення, при якому резонансна частота вузькосмугового підсилювача 9 дорівнює  $f_{01}$ , а тривалість імпульсів струму

$$t_j = \left(k + \frac{1}{2}\right) \frac{1}{f_{01}}$$

Після виявлення місця знаходження пошукового маркера перемикач 14 послідовно переводиться в інше положення до тих пір, поки індикатор не зареєструє сигнал від ідентифікаційного маркера. За положенням перемикача встановлюється частота, а значить і номер ідентифікаційного маркера. Очевидно, що ідентифікованими можуть бути тільки ті маркери, частота власних коливань яких співпадає з резонансними частотами, на яких може працювати підсилювач 9.

Таким чином, в описаних системах здійснюється подвійна фільтрація інформативного сигналу за допомогою вузькосмугових підсилювачів і усереднюючих перетворювачів. За рахунок цього забезпечується суттєве придушення зовнішніх завад, наведених на випромінювально-приймальну рамку, та шумів підсилювального тракту, тобто досягається необхідна глибинність і надійність виявлення закопаних у ґрунті маркерів. Описаний пристрій дозволяє ідентифікувати електромагнітні маркери за частотою, за рахунок чого розширюються його функціональні можливості.

1. Драбич О. П., Драбич П. П., Стецько І. Г., Яворський І. М. Обробка сигналів, випромінюваних підземними комунікаціями та іншими об'єктами // Праці четвертої всеукраїнської міжнародної конференції "Оброблення сигналів і зображень та розпізнавання образів" – К.: УАОІРО. – 19-23 жовтня 1988. – С. 119-122.
2. Драбич П., Драбич О., Стецько І. Електромагнітні прилади і системи для пошуку і обстеження підземних магістральних трубопроводів // Проблеми корозії і протикорозійного захисту конструкційних матеріалів: В 2-х т. / Спецвипуск журналу "Фізико-хімічна механіка матеріалів" – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2000. – Т. 2. – С. 710-715.
3. Пат. 32267 А. Україна. МПК<sup>6</sup> G01V3/10, G01R19/00. Пристрій для пошуку електромагнітних маркерів / О. А. Вакульський, П. П. Драбич, О. П. Драбич, І. М. Яворський. – Опубл. 15.12.2000, Бюл. № 7 – II.
4. Гинзбург С. Г. Методы решения задач по переходным процессам в электрических цепях. – М.: Высшая школа, 1967. – 367 с.