

ЕЛЕКТРОННІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИБАДИ І СИСТЕМИ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ СЕРЕДОВИЩ ТА ПОШУКУ І ОБСТЕЖЕННЯ ЗАХОВАНИХ ОБ'ЄКТІВ

П.П.Драбич

Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка
НАН України
м. Львів, вул. Наукова, 5

Проблема дослідження середовищ, зокрема надр Землі з метою виявлення родовищ корисних копалин (нафти, газу, руд чорних і кольорових металів), а також підземних запасів мінеральних та прісних вод залишається без жодних сумнівів актуальною. Крім цього, актуальною залишається теж проблема пошуку, визначення координат та технічних характеристик неперервно зростаючої кількості розміщених у ґрунті інженерних комунікацій, зокрема нафто-, газо- та продуктопроводів, кабелів електропередач, кабелів зв'язку, телекомунікацій, і, разом з ними різноманітних пристроїв керування, регулювання, кранів, муфт, розгалужень, тощо.

Одним із ефективних методів, що використовуються в практиці є зондування обстежуваних середовищ і об'єктів імпульсним або гармонічним електромагнітним полем. Для пошуку і обстеження захищених інженерних комунікацій широко використовуються також методи, які засновані на визначенні параметрів випромінюваних цими комунікаціями фізичних полів, зокрема акустичних або електромагнітних.

При проведенні електромагнітних досліджень на приймальний перетворювач одночасно з інформативним сигналом діють поля-завади імпульсного та неперервного характеру, які зумовлюють його стохастичну структуру.

Оскільки вимірні сигнали є стохастичними, то їх інформативні параметри слід оцінювати статистичними методами. Оцінку інформативних параметрів в більшості практичних випадків можна здійснити простим усередненням за однією реалізацією, яке можна реалізувати методом лінійного накопичення, ковзного середнього або вагового усереднення. При реалізації останнього дещо зростає статистична похибка оцінки. Але вагове усереднення на основі різницевої або диференційної рівнянь одночасно з усередненням забезпечує

необхідне функціональне перетворення оцінок одного або декількох випадкових процесів.

Синтезовані на основі різницевої рівнянь обчислювальні перетворювачі знайшли ефективне застосування в таких розробках ФМІ ім. Г.В.Карпенка, як портативна апаратура ППРС-2М [1] для дослідження верхньої частини розрізу Землі (від 1 до 200м), імпульсна пошуково-розвідувальна апаратура ППР-1 та ППР-2 [2], для пошуку корисних копалин на глибині від 200м до 2км, серії приладів для визначення координат та місць пошкодження ізоляції струмопровідних підземних комунікацій ІМК-1 ÷ ІМК-4 [3], в електромагнітній маркерній системі МС-3, для виявлення закопаних в ґрунт над функціонально важливими вузлами комунікацій електромагнітних маркерів [4] та ін.

Структурна схема апаратури ППРС-2М показана на рис. 1.

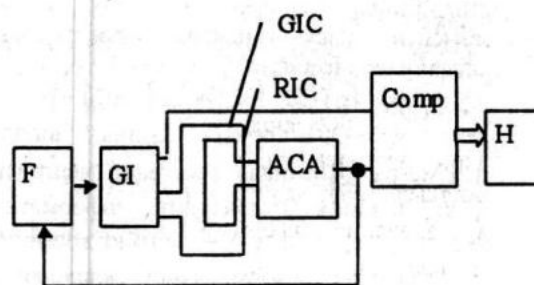


Рис. 1

Апаратура ППРС-2М складається з формувача імпульсів керування F, генератора імпульсів струму GI, генераторної індукційної рамки GIC, приймальної індукційної рамки RIC, імпульсного підсилювача ACA, блока обробки інформації Comp та цифрового індикатора H.

Апаратура забезпечує вимірювання значень електрорушійної сили (е.р.с.), наведеної в приймальному індукційному перетворювачі в паузах між імпульсами біполярного струму в генераторному контурі та її відношення до амплітуди імпульсів зондуючого струму на фоні регулярних і випадкових завад і працює наступним чином.

Нехай в приймальній індуктивній рамці RIC наводиться е.р.с. регулярної завади від промислових електроустановок та ліній електропередач з періодом T.

Із сигналу завади, виділеної з допомогою смугового фільтру, розміщеного у формувачі F, фіксуються моменти переходу її через нульову лінію, котрі використовуються як сигнал початку випромінювання в досліджуване середовище імпульсів

електромагнітного поля тривалістю $3/8 T$. Вказана тривалість імпульсів і пауза між ними, яка рівна $1/8 T$, формується формувачем F, а імпульсне електромагнітне поле утворюється шляхом подачі в генераторну індукційну рамку GIC біполярних прямокутних імпульсів струму з виходу генератора GI.

Під дією імпульсів електромагнітного поля в середовищі протікають в певному напрямку блукаючі струми. Після закінчення чергового імпульсу струму блукаючі струми, розсіюючись і зникаючи в середовищі, утворюють імпульсне електромагнітне поле, під дією якого в приймальній рамці RIC наводяться імпульси е.р.с., в яких міститься інформація про досліджуване середовище. Зареєстровані імпульси напруги через підсилювач АСА подаються на вхід обчислювального пристрою Comp синхронізованого від генератора GI. В обчислювальному пристрої здійснюється статистична обробка виділених в задані моменти часу значень зареєстрованого сигналу по алгоритму

$$\Delta Q_i = a_1[\varepsilon_i - (\varepsilon_i) + (u_{mi} - u_{mi}) + u_{mi}] - b_1 Q(i-1), \quad (1)$$

де: $\Delta Q_i = Q(i) - Q(i-1)$ - зміна вихідного параметра $Q(i)$ після реєстрації чергової i -ї пари вхідних біполярних інформативних імпульсів $\varepsilon(i)$, a_1 і b_1 - постійні коефіцієнти, ε_i - значення інформативної складової i -го сигналу, $i \in Z$, $Z = 0, 1, 2, 3, \dots$, u_{mi} - i -е миттєве значення регулярної завади, u_{mi} - миттєве значення високочастотної завади.

Розв'язок рівняння (1) для середніх значень $\bar{Q}(i)$ і $\bar{\varepsilon} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\varepsilon_i + u_{mi})$ при початковій умові $Q(0) = Q_0$ має вигляд:

$$\bar{Q}(i) = 2 \frac{a_1}{b_1} \bar{\varepsilon} [1 - W(i)] + Q_0 W(i),$$

де $W(i) = (1 - b_1)^i$ - вагова функція, що характеризує інерційність обчислювального пристрою.

Після закінчення перехідного процесу

$$\bar{Q}(\infty) = 2 \frac{a_1}{b_1} \bar{\varepsilon},$$

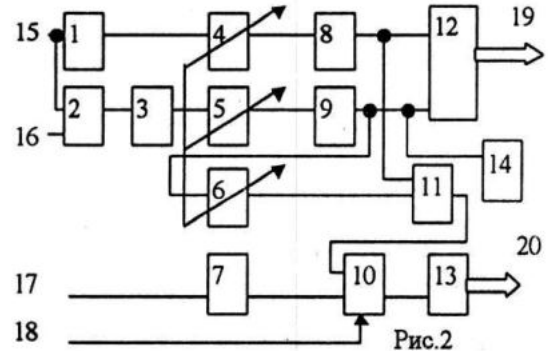
тобто лінійно залежить від середнього значення інформативного сигналу в заданий момент часу.

Як видно з (1) регулярна завада придушується в обчислювальному перетворювачі практично повністю. Крім того, за рахунок вагового усереднення обчислювальний пристрій дозволяє визначити середнє значення $\bar{\varepsilon}$ з відносною статистичною похибкою [5].

$$\delta_{ст} = \frac{\sqrt{DQ(\infty)}}{Q(\infty)} 100\% = \frac{D(\varepsilon)}{\bar{\varepsilon}} \sqrt{\frac{b_1}{2}} 100\%.$$

У випадку, коли регулярна завада менша від заданої порогової величини, апаратура ППС-2М працює в режимі внутрішньої синхронізації.

Структурна схема приладу ІМК-4 показана на рис.2.



Він складається з перестроюваних вузькосмугових підсилювачів напруги 1 і 3, диференційного підсилювача змінної напруги 2, керованих підсилювачів змінного струму 4 і 5, керованого подільника напруги 6, підсилювача постійної напруги 7, усереднюючих перетворювачів змінної напруги в постійну 8 і 9, мультиплексора 10, суматора постійних напруг 11 та аналого-цифрових перетворювачів 12 і 13.

Прилад забезпечує визначення осі та глибини залягання підземних (підводних) протяжних струмопровідних комунікацій (магістральних нафто-, газо- та продуктопроводів кабелів зв'язку і електропередач, телекомунікацій, тощо), а також здійснює вимірювання потенціалу вздовж осі комунікації на денній поверхні.

Принцип дії приладу заснований на дослідженні випромінюваних комунікацією електромагнітних полів, а також електричних полів, зумовлених витіканням в ґрунт в місцях пошкодження ізоляції електричного струму комунікації і полягає в наступному.

Нехай на входи 15 і 16 подаються напруги (е.р.с.) наведені горизонтальною складовою магнітного поля комунікації в індукційних первинних перетворювачах (котушках) (на рис.2 не показані), які розміщені в горизонтальній площині перпендикулярно до осі комунікації, причому е.р.с. в ближній до осі комунікації котушці

$$\varepsilon_1(t) = k \frac{I(t)}{2\pi h}, \quad (2)$$

а е.р.с. в дальній котушці

$$\varepsilon_2(t) = k \frac{I(t)}{2\pi(h+h_0)}. \quad (3)$$

В рівняннях (2) і (3) $I(t)$ - струм в комунікації, h - глибина її залягання, h_0 - відстань між осями котушок, $k = \mu_0 \mu_T f W S$, μ_0 - магнітна проникненість повітря, μ_T - відносна магнітна проникненість осердя котушки, f - частота струму $I(t)$, W - кількість витків в кожній котушці, а S - площа їх середнього витка.

Напруга $\varepsilon_2(t)$ підсилюється підсилювачами 1 і 4, випрямляється перетворювачем 8 і подається на інформаційний вхід аналогоцифрового перетворювача 12. Сформована з допомогою диференційного підсилювача 2 різниця напруг $\varepsilon_1(t)$ і $\varepsilon_2(t)$ підсилюється підсилювачами 3 і 5, випрямляється і усереднюється перетворювачем 9 і подається на опорний вхід перетворювача 11, а також на вхід перетворювача постійної напруги в звуковий сигнал 14.

В результаті на цифровому виході перетворювача 12 утворюється число

$$N = k_{A/D} \frac{k_1 k_4 k_8 E_2}{k_2 k_3 k_5 k_9 E_1 - E_2},$$

де $k_{A/D}$ - коефіцієнт перетворення аналогоцифрового перетворювача 12, $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_8, k_9$ - коефіцієнти підсилення відповідних елементів схеми, а E_1 і E_2 - усереднені амплітудні значення е.р.с. $\varepsilon_1(t)$ і $\varepsilon_2(t)$.

$$\text{При } k_{A/D} \frac{k_1 k_4 k_8}{k_2 k_3 k_5 k_9} = h_0$$

$$N = h_0 \frac{E_2}{E_1 - E_2} = h.$$

Усереднення випадкових амплітудних значень E_{11} і E_{21} здійснюється в перетворювачах 8 і 9 за алгоритмом, аналогічним до (1). За допомогою подільника 6 та суматора 11 формується значення амплітуди E_1 , яке використовується при визначенні амплітуди струму I_m в комунікації по формулі $I_m = h E_1$.

На вхід 17 подається з допомогою мідносльфатного електрода відносно потенціалу комунікації (труби) постійна напруга u_K , яка утворюється на поверхні ґрунту внаслідок виткання з комунікації струму $I(t)$ в місцях порушення її ізоляції. В залежності від керуючого сигналу на вході 18 з виходу мультиплектора 10 на вхід перетворювача 13 подається напруга E_1 або напруга, пропорційна до u_K .

В даному пристрої визначення осі комунікації здійснюється по різницевому сигналу $E_1 - E_2$, що суттєво підвищує його

завадостійкість при наявності поруч з обстежуваною інших комунікацій, а вимірювання напруги u_K і визначення амплітуди струму I_m дозволяє знаходити місця пошкодження ізоляції обстежуваних комунікацій і оцінювати перехідний опір між комунікацією і ґрунтом.

В приладі є також система калібрування, яка охоплює весь вимірювальний тракт включно з індукційними котушками (на рис.2 не показана).

Сигнали з виходів 19 і 20 реєструються цифровим індикатором або можуть заноситись в оперативну пам'ять для подальшої обробки на персональному комп'ютері.

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

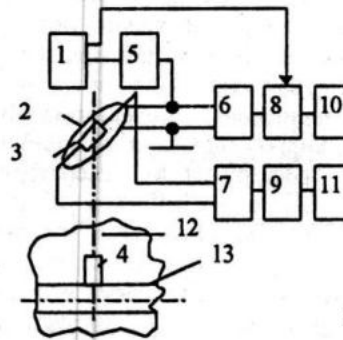


Рис.3

Вона складається з формувача імпульсів керування 1, генераторно-приймальної рамки 2 з вертикальною віссю чутливості та приймальної індукційної котушки 3 з горизонтальною віссю чутливості, електромагнітного маркера 4 у вигляді LC-контуру, 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 певного елемента, чи відрізка, які виконують важливі функції, а також точну прив'язку вздовж осі даних внутрітубного обстеження магістральних трубопроводів з допомогою акустичних або електромагнітних випромінювань і працює наступним чином.

Нехай на 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 $H_1(t)$ по аналогії з (2) наводиться е.р.с.

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

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 закопаних над ним маркерів. Цей пошук відбувається наступним чином.

При поданні з виходу генератора 5 імпульсів струму в генераторно-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 випромінююся в навколишнє середовище і реєструються генераторно-приймальною рамкою 2. Імпульси напруги підсилюються підсилювачем 6 і поступають на вхід перетворювача 8, керованого сигналом з виходу формувача 1. Під дією імпульсу керування тривалістю T_0 , затриманого відносно моменту закінчення зондуемого імпульсу електромагнітного поля, в перетворювачі 8 здійснюється накопичення максимальних значень i -го коливного процесу.

Алгоритм роботи усереднюючого перетворювача 8 описується неоднорідним лінійним різницею рівнянням

$$\Delta U_i = a_2 \sum_{n=1}^{N_0} A_n - b_2 U(i) = a_2 A_n - b_2 U(i), \quad (4)$$

де: ΔU_i - зміна вихідної напруги $U(i)$ перетворювача після дії i -го зондуемого імпульсу, a_2 і b_2 - постійні коефіцієнти, $N_0 = T_0 f_0$, f_0 - резонансна частота маркера, A_n - n -е амплітудне значення i -го відеоімпульсу в t_{ni} -ий момент часу, причому $A_n = A_0 \exp(-\alpha t_{ni})$, A_0 - максимальне (при $n=1$) амплітудне значення i -ї послідовності,

$$A_i = \sum_{n=1}^{N_0} A_n.$$

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

Розв'язок (4) для середніх значень \bar{A} та $\bar{U}(i)$ при початковій умові $U(0) = U_0$ має вигляд:

$$\bar{U}(i) = K_0 \bar{A} [1 - W(i)] + U_0 W(i), \quad (5)$$

де: $K_0 = \frac{a_2}{b_2}$ - масштабний коефіцієнт

перетворення \bar{A} в постійну напругу $\bar{U}(i)$, $W(i) = (1 + b_2)^{-i}$ - вагова функція, що характеризує швидкість зміни вихідної напруги $\bar{U}(i)$ в залежності від аргументу i .

Після закінчення перехідного процесу ($i \gg 1$) вагова функція $W(i) \rightarrow 0$, значить

$$\bar{U}(\infty) = K_0 \bar{A},$$

тобто вихідна напруга усереднюючого перетворювача 8 в усталеному режимі є лінійною функцією від середнього значення \bar{A} суми амплітуд A_n на інтервалі часу T_0 при фіксованій відстані між котушкою 2 та маркером 4.

Напруга $\bar{U}(\infty)$ за допомогою перетворювача 10 перетворюється в звуковий сигнал.

При відсутності маркера 4 $U(\infty) = 0$, тобто звуковий сигнал відсутній.

Звуковий сигнал в перетворювачі 10 зникає теж при повертанні котушки 2 на 90° , тобто в положенні, коли її площина збігається з віссю маркера 4.

В маркерній системі МС-3 здійснюється двійна фільтрація інформативного сигналу за допомогою вузькосмугового підсилювача 6 і усереднюючого перетворювача 8. За рахунок цього забезпечується суттєве придушення зовнішніх завад, наведених на генераторно-приймальну рамку 2 та шумів підсилювального тракту, тобто досягається необхідна глибинність і надійність виявлення закопаних в ґрунті маркерів.

Технічні характеристики пошукових електромагнітних приладів і систем.

Апаратура ППРС-2М

- амплітуда біполярних імпульсів струму в генераторному контурі від 0,5 до 5А;
- тривалість імпульсів струму 14мс;
- діапазон часових затримок від 2 до 5999мкс з дискретністю 1мкс;
- похибка установки затримки не більше 1%;
- поріг чутливості при вимірюванні відношення е.р.с. до амплітуди імпульсів струму 5мкВ/А;
- індикація результату вимірювання цифрова;
- коефіцієнт придушення регулярних завад не менше 60дБ;
- коефіцієнт придушення високочастотних випадкових завад не менше 40дБ.

Ефективне придушення регулярних завад в апаратурі ППРС-2М реалізується за допомогою диференційного методу і синхронізації роботи

генераторного та вимірювальних каналів по цій заваді, а придушення високочастотних випадкових завад здійснюється шляхом усереднення значень сигналу в фіксовані моменти часу (на заданій затримці) відносно моменту виключення чергового імпульсу струму в генераторному контурі.

Прилад для пошуку і обстеження ізоляції підземних кабелів і трубопроводів ІМК-4.

- працює на трьох частотах - 50, 100, 222Гц. Частота 222Гц використовується при роботі в складних умовах, коли значна кількість комунікацій сконцентрована поруч або при відсутності в них струмів з частотами 50 і 100Гц;
- глибина виявлення комунікації до 10м;
- розміри приладу 260x160x100мм, довжина штанги з котушками 82см, а котушок - 14,5см;
- вага приладу 2,2кг, штанги з котушками - 1,1кг;
- живлення приладу від одного акумулятора типу 7Д-0,115-VI;
- струм споживання 4мА;
- зарядка акумулятора від мережі 220В або акумулятора 12В;
- для роботи на частоті 222Гц прилад комплектується генератором змінного струму ГС-1 [6] з наступними технічними характеристиками:
- вихідна потужність 100ВА;
- частота вихідного сигналу 100, 222, 300 і 1000Гц;
- похибка установки частоти не більше 0,1%;
- діапазон зміни вихідної напруги від 10 до 60В з дискретністю 10В;
- живлення від акумулятора напругою 12В.

Електромагнітна маркерна система МС-3

- глибина виявлення осі комунікації до 10м;
- глибина виявлення маркера 1,2+1,5м при радіусі чутливості на поверхні ґрунту відносно його осі 0,5+0,8м;
- похибка визначення осі комунікації на частотах 50, 100 або 222Гц не більше $\pm 0,2$ м;
- похибка виявлення осі маркера не більше $\pm 0,05$ м;
- резонансна частота маркера 101кГц;
- індикація виявлення маркера звукова, а осі комунікації - аналогова;
- маса індикаторного пристрою 1,8кг;
- маса маркера 0,1кг;
- живлення індикаторного пристрою від 12 акумуляторів типу SAFT-1,2V-1200mA;
- час неперервної роботи не менше 8год;
- зарядка акумуляторів від електромережі 220В або від автомобільного акумулятора;

- прилад оснащений регулятором чутливості і світловою індикацією розрядки акумуляторів.

1. Пат.10564А. Україна. МПК⁶ G01V3/10. *Спосіб геоелектророзвідки і пристрій для його здійснення* / П.П.Драбич, А.Л.Петровський, В.І.Шамоко, І.М.Яворський - Опубл.25.12.96. Бюл.№4.
2. *Исследование интегральных переходных характеристик в импульсной индукционной электроразведке* / Ф.М.Каменецкий, А.А.Вакульский, П.П.Драбич и др. - Львов: ФМИ им.Г.В.Карпенко АН УССР, 1985. - 56с.
3. Пат.15042А. Україна. МПК⁶ G01V3/10. *Глибиномір* / О.А.Вакульський, П.П.Драбич, В.Г.Дума. - Опубл.30.06.97. Бюл.№3.
4. Пат.25096А. Україна. МПК⁶ G01V3/10. *Пристрій для пошуку електромагнітних маркерів* / П.П.Драбич, Й.Л.Зубик, А.О.Кичма, І.Г.Стецько - Опубл.30.10.98. Бюл.№4.
5. Драбич П.П. *Сравнение рекуррентных алгоритмов оценивания параметров импульсных сигналов на основе разностных уравнений первого порядка* / Метрология. - М.: Изд-во стандартов, 1989, №2. С.3-6.
6. Пат.10884А. Україна. МПК⁶ G01V3/10, H03K3/84. *Генератор для пошуку підземних комунікацій* / П.П.Драбич - Опубл.25.12.96. Бюл.№4.