Наука та інновації. 2006. Т 2. № 5. С. 41–52.

П. П. Драбич, О. П. Драбич, П. Б. Дуб, М. Д. Пугач, І. Г. Стецько, І. М. Яворський

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

ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ПОШУКОВО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА ІМК-5

Анотація: Описана структурна схема, принцип дії і методика метрологічної атестації розробленої у ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України електромагнітної пошуково-вимірювальної системи ІМК-5, яка одночасно визначає вісь протяжних підземних струмопровідних комунікацій, вимірює глибину їх залягання і виявляє безконтактним методом місця пошкоджень ізоляційних покрить. Наведені технічні характеристики створеної системи.

Ключові слова: підземна комунікація, пошуково-вимірювальна система, метрологічна атестація.

П. П. Драбич, О. П. Драбич, П. Б. Дуб, Н. Д. Пугач, И. Г. Стецко, И. М. Яворский. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ПОИСКОВО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ІМК-5.

Аннотация: Описана структурная схема, принцип действия и методика метрологической аттестации разработанной в ФМИ им. Г. В. Карпенко НАН Украины электромагнитной поисково-измерительной системы ІМК-5, которая одновременно определяет ось протяженных подземных токопроводящих коммуникаций, измеряет глубину их залегания и определяет бесконтактным методом места повреждений изоляционных покрытий. Приведены технические характеристики созданной системы.

Ключевые слова: подземная коммуникация, поисково-измерительная система, метрологическая аттестация.

P. P. Drabych, O. P. Drabych, P. B. Dub, M. D. Puhach, I. H. Stetsko, I. M. Javorskyi. THE IMK-5 ELECTROMAGNETIC SEARCHING-MEASURING SYSTEM.

Abstract: The block diagram, operation principle and metrological attestation method of the designed in the Karpenko PMI of the NAS of Ukraine IMK-5 electromagnetic searching-measuring system, that simultaneously searches axes of stretched underground current conducting communications, measures their laying depth and determines places of insulation covering damages, are described. The technical characteristics of the elaborated system are presented.

Keywords: underground communication, searching-measuring system, metrological attestation.

1. ВСТУП

Постійно зростаюча мережа підземних комунікацій вимагає створення нових ефективних засобів оперативного визначення їх осі, глибини залягання та місць пошкоджень ізоляції.

Для розв'язання цих задач на практиці широко застосовується електромагнітний метод, який ґрунтується на визначенні числових характеристик електромагнітних коливань, випромінюваних обстежуваними комунікаціями при протіканні в них електричного струму за допомогою спеціальних генераторів або у вигляді гармоніки струму катодного захисту трубопроводів [1–11].

Існуючі електромагнітні пошуково-вимірювальні системи (ЕМПВС) [1–6, 9, 11] не завжди забезпечують необхідну завадостійкість визначення числових характеристик зареєстрованого сигналу. Крім того, ці прилади і системи зазвичай визначають параметри лише магнітної

© П. П. Драбич, О. П. Драбич, П. Б. Дуб, М. Д. Пугач, І. Г. Стецько, І. М. Яворський. 2006

складової випромінюваного комунікацією електромагнітного поля. Це до певної міри обмежує функціональні можливості сучасних ЕМПВС.

Підвищеною завадостійкістю і ефективністю відзначаються розроблені у Фізико-механічному інституті (ФМІ) ім. Г. В. Карпенка НАН України системи ІМК-1 – ІМК-4 для пошуку і обстеження підземних комунікацій з генератором ГС-1 [8, 12].

Підвищена завадостійкість цих приладів забезпечується тим, що вісь комунікації визначається за різницевим сигналом від ближньої і дальньої котушок та поданням у комунікацію струму від генератора ГС-1 з частотою, не кратною частоті промислової електромережі та її гармонікам [8].

Місця пошкодження ізоляції за допомогою приладу ІМК-4 [12] визначаються контактним методом, який практично не ефективний у випадку, коли поверхня ґрунту покрита асфальтом або бетоном.

Тому у рамках науково-технічного інноваційного проекту "Створення електромагнітної пошуково-вимірювальної системи ІМК-5", затвердженого Постановами Бюро Президії НАН України № 176 від 24.06.2004 р. та № 180 від 13.07.2005 р., була розроблена нова електромагнітна пошуково-вимірювальна система ІМК-5 для підвищення ефективності пошуку і обстеження підземних комунікацій. Система захищена патентами України [13–16].

При виконанні інноваційного проекту були досліджені зміни над земною поверхнею електричної складової електромагнітного поля, що випромінюється підземними протяжними струмопровідними комунікаціями, у залежності від частоти струму в них; оптимізовані структурні та принципові електричні схеми; розроблена ескізна і робоча конструкторська та експлуатаційна документації; виготовлені 1 виставочний та 5 дослідних зразків.

Були проаналізовані методи метрологічної атестації, досліджено характер зміни складових електромагнітного поля прямокутних провідників великих і малих розмірів, по яких протікає струм, та кілець Гельмгольца для створення еталонного електромагнітного поля, а також розроблена програма відомчої атестації ЕМПВС.

Система ІМК-5 складається з генераторного та індикаторного блоків. Індикаторний блок містить розташовані на одному каркасі вимірювальний пристрій, два паралельно розміщені у горизонтальній площині індукційні перетворювачі (котушки), телескопічну антену, цифровий і аналоговий індикатори та навушники [17].

Система ІМК-5 одночасно здійснює безконтактним методом пошук осі й вимірювання глибини залягання комунікацій, а також виявляє місця пошкоджень їх ізоляції. Для забезпечення завадостійкості від сигналів-завад сусідніх комунікацій і високовольтних ліній електропередач координати обстежуваної комунікації визначають за різницевим сигналом індукційних котушок, а в особливо складних умовах завадостійке виділення і визначення координат комунікацій (коли значна їх кількість сконцентрована поруч) здійснюють шляхом подачі в обстежувану комунікацію змінного струму частотою 222 Гц, не кратною частоті струму промислової електромережі та її гармонікам, тобто частотам 50 і 100 Гц. Місця пошкодження ізоляції визначаються шляхом одночасної подачі в комунікацію високочастотного сигналу, який, протікаючи в ній, утворює відповідне високочастотне поле, електрична складова якого реєструється над поверхнею ґрунту телескопічною антеною. Зупинимось детальніше на будові та принципі дії індикаторного та генераторного блоків.

2. СТРУКТУРНА СХЕМА ГЕНЕРАТОРНОГО БЛОКА ГС-2

Структурна схема генераторного блока показана на рис. 1а, а епюра сигналу на його виході – на рис. 1б.

Генератор виробляє змінну низькочастотну напругу типу "меандр" з високостабільною частотою, в якій періодично на заданому інтервалі часу виникає високочастотна складова. Генератор працює таким чином.

Формувач імпульсів 1 виробляє на своїх прямому й інверсному виходах протифазні імпульсні послідовності, причому на прямому виході утворюється сигнал, показаний на діаграмі (рис. 1б). Сигнали з виходів формувача 1 надходять на перші входи логічних елементів І 2 і 3. При наявності на других входах цих елементів потенціалу логічної одиниці, що забезпечується подачею короткого додатного імпульсу на клему "ПУСК", імпульсні

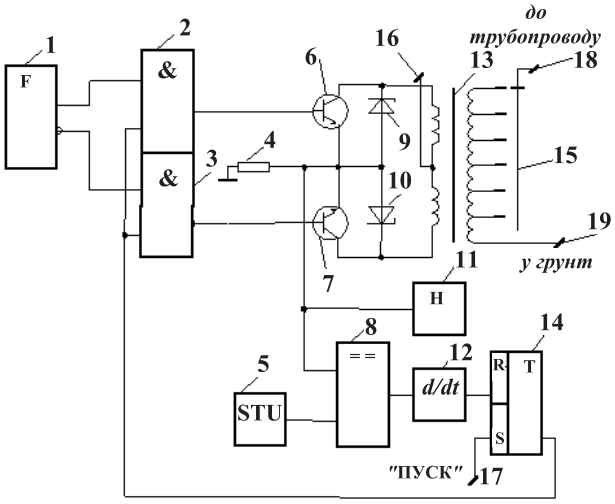

Рис. 1а. Структурна схема генераторного блока ГС-2: 1 – формувач імпульсів; 2 і 3 – логічні елементи І; 4 – шунт; 5 – джерело опорної напруги; 6 і 7 – вихідні транзистори; 8 – компаратор; 9 і 10 – стабілітрони; 11 – індикатор вихідної потужності; 12 – елемент диференціювання; 13 – вихідний трансформатор; 14 – тригер; 15 – перемикач; 16 – шина джерела постійної напруги; 17 – клема "ПУСК"; 18 і 19 – вихідні клеми

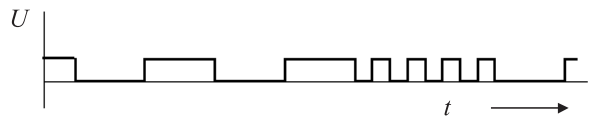

Рис. 1б. Епюра вихідного сигналу генераторного блока ГС-2

послідовності з виходів елементів 2 і 3 надходять на бази вихідних транзисторів 6 і 7, які під їх дією працюють у ключовому режимі.

Стабілітрони 9 і 10 запобігають пробою транзисторів 6 і 7 високовольтними імпульсами електрорушійної сили самоіндукції трансформатора 13, які виникають в моменти запирання транзисторів.

Трансформатор 13, перемикач 15 й індикатор 11 використовуються для узгодження вихідного каскаду з навантаженням по максимальній вихідній потужності. Якщо вихідна потужність перевищує задане значення, на шунті 4 утворюється постійна напруга

$$u_{ш} = I_{ш}R_{ш} > u_{stu}\,, \qquad (1)$$

де $I_{ш}$ – струм у шунті, $R_{ш}$ – опір шунта, u_{stu} – напруга на виході джерела опорної напруги 5. Внаслідок цього на виході компаратора 8 виникає додатний потенціал, який, пройшовши через елемент диференціювання 12, переводить тригер 14 у нульовий стан. Під дією потенціалу логічного нуля припиняється проходження через логічні елементи 2 та 3 імпульсних послідовностей з виходів формувача 1, тобто блокується робота заявленого пристрою.

Для запуску генератора при відсутності перенавантаження ($u_{ш} < u_{stu}$) необхідно знову подати короткий додатний імпульс на клему 17 "ПУСК".

Зміною значень величини u_{stu} здійснюється захист вихідного каскаду заявленого пристрою при різних значеннях вихідної потужності.

Генератор виробляє низькочастотну змінну напругу, що при підключенні його до обстежуваної комунікації дає можливість визначати індуктивним методом її напрямок та глибину залягання на значній відстані від місця з'єднання. Апаратурою аналогічного призначення контактним методом на поверхні ґрунту над комунікацією вимірюють зміну електричного потенціалу, обумовлену витікан-

ням у ґрунт постійного струму з комунікації, і визначають місця пошкодження її ізоляції. Контактний метод вимагає значних затрат часу, а у випадках, коли ґрунт над комунікацією покритий бетоном або асфальтом, вимірювати цей потенціал контактним методом проблематично, тому у вихідному низькочастотному сигналі генератора періодично на заданому інтервалі часу виникає високочастотна складова сигналу (струму), яка, надходячи в комунікацію, утворює аналогічні за частотою пакети електромагнітних хвиль, котрі можна реєструвати безконтактним методом. Низькочастотна складова випромінюваних комунікацією коливань реєструється індуктивними котушками і використовується для визначення осі та глибини залягання комунікації, а електрична складова високочастотних коливань в місцях пошкодження ізоляції реєструється антеною.

Частоту, на якій ведеться пошук дефектів ізоляції, вибрано рівною 10 кГц. Вибір її значення значно вищим, ніж для вимірювання магнітного поля, обумовлений тим, що радіальна складова електричного поля досить суттєво зростає з частотою, і для реєстрації можна використовувати відносно невелику штирову антену. Подальше збільшення частоти не доцільне у зв'язку зі значним згасанням струму в комунікації при її зростанні, посиленням впливу ємнісних ефектів і появою додаткових інструментальних похибок.

3. СТРУКТУРНА СХЕМА ІНДИКАТОРНОГО БЛОКА СИСТЕМИ ІМК-5

Роботу індикаторного блока ІМК-5 (рис. 2) можна описати таким чином.

Нехай ближня і віддалена від трубопроводу пари котушок 2 і 4 та 3 і 5 розміщені над його віссю і розташовані на відстані *a* одна від одної паралельно в площині, перпендикулярній до осі комунікації. Під час протікання

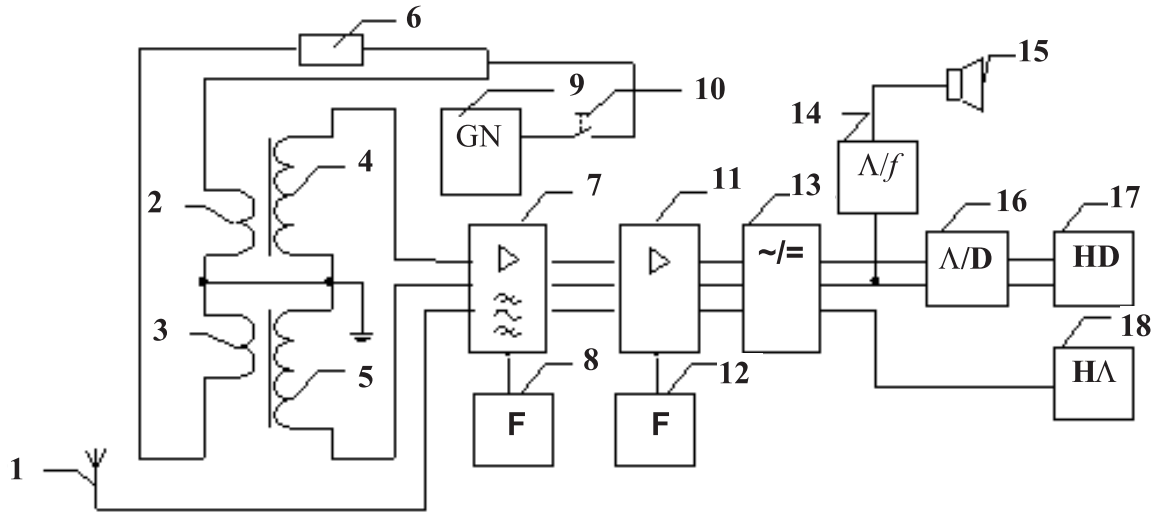

Рис. 2. Структурна схема індикаторного блока ІМК-5: 1 – антена; 2 і 3 – калібрувальні котушки; 4 і 5 – приймальні котушки; 6 – резистор; 7 – блок перестроюваних вузькосмугових підсилювачів; 8 – пристрій встановлення робочої частоти; 9 – генератор калібрувальних сигналів; 10 – вмикач; 11 – блок керованих підсилювачів; 12 – регулятор підсилення; 13 – блок усереднювальних перетворювачів змінних напруг в постійні; 14 – перетворювач напруги в частоту; 15 – звуковий індикатор; 16 – аналого-цифровий перетворювач; 17 і 18 – цифровий і стрілковий індикатори

від спеціалізованого генератора по закопаній в ґрунті комунікації змінного струму $I(t)$ навколо неї виникає магнітне поле, силові лінії якого є концентричними колами в площині, перпендикулярній до осі комунікації. Напруженості магнітного поля на відстанях h і $h + a$ від осі комунікації визначають із рівнянь

$$H_1(t) = I(t) / 2\pi h$$

$$H_2(t) = I(t) / 2\pi (h + a), \qquad (2)$$

де h – відстань між осями комунікації та ближньої пари котушок 2 і 4.

Під дією випромінюваного трубою магнітного поля в котушках 4 і 5 виникають електрорушійні сили (е.р.с.) $e_1(t)$ і $e_2(t)$, які відповідно пропорційні до $H_1(t)$ та $H_2(t)$. Е.р.с. надходять на перший і другий входи блока 7. На його першому і другому виходах утворюються напруги $u_2(t) = k_1 e_2(t)$ та $\Delta u(t) = k_2 \Delta e(t)$, де $\Delta e(t) = e_1(t) - e_2(t)$; k_1 і k_2 – коефіцієнти підсилення першого і другого каналів.

Робоча частота вузькосмугових підсилювачів дорівнює частоті низькочастотної складової сигналу з виходу спеціалізованого генератора і задається в ІМК-5 пристроєм 8.

Далі напруги $u_2(t)$ та $\Delta u(t)$ підсилюються за допомогою першого і другого каналів блока 11. На першому та другому виходах останнього утворюються напруги

$$u_2^*(t) = k_1 k_3 e_2(t) \text{ і } \Delta u^*(t) = k_2 k_4 \Delta e(t), \qquad (3)$$

де k_3 і k_4 – коефіцієнти підсилення першого і другого каналів блока 11, які задаються регулятором 12.

Напруги $u_2^*(t)$ і $\Delta u^*(t)$ надходять на перший і другий входи блока 13, на відповідних виходах якого утворюються постійні напруги

$$U_2 = k_1 k_3 k_5 E_2 \text{ та } \Delta U = k_2 k_4 k_6 \Delta E, \qquad (4)$$

де k_5 і k_6 – масштабні коефіцієнти першого і другого перетворювачів; $\Delta E = E_1 - E_2$, а E_1 і E_2 – амплітудні значення е.р.с. на виходах ближньої і дальньої приймальних котушок.

Напруги U_2 і ΔU надходять на перший і другий входи аналого-цифрового перетворювача 16, на виході якого утворюється число

$$N = k_{A/D} U_2 / \Delta U = k_0 E_2 / \Delta E, \qquad (5)$$

де $k_0 = k_{A/D} k_1 k_3 k_5 / k_2 k_4 k_6$ – постійний масштабний коефіцієнт.

Відомо [1], що $h = aE_2 / \Delta E$, тоді, при $(k_0 / a) = 1$ м$^{-1}$, покази цифрового індикатора 17 відповідають глибині h.

Для пошуку осі комунікації напруга ΔU за допомогою пристрою 14 перетворюється в звуковий сигнал, який надходить на звуковий індикатор 15. Вісь комунікації шукають за різницевим сигналом ΔU таким чином.

Коли приймальні котушки в ближній і дальній парах розміщені від обстежуваної комунікації далеко, наведені в них е.р.с. $e_1(t)$ та $e_2(t)$ майже рівні і різницевий сигнал $\Delta e(t) \to 0$. З їх наближенням до осі комунікації $\Delta e(t)$ зростає і над її віссю досягає максимального значення Δe_m.

Якщо вісь комунікації визначати як Δe_m, то зменшується вплив магнітних полів від сусідніх комунікацій і, відповідно, зростає точність визначення її осі і глибини залягання.

Калібрувальні котушки 2 і 3, які індуктивно пов'язані з приймальними котушками 4 і 5, калібрувальний генератор 9, резистор 6 та вмикач 10 забезпечують можливість калібрування та перевірки правильності роботи всього вимірювального тракту як в лабораторних, так і в польових умовах.

Пошук місць пошкодження ізоляції здійснюють шляхом реєстрації електричної складової електромагнітного поля, що випромінюється підземною комунікацією під час протікання в ній змінного струму від приєднаного до неї спеціалізованого генератора. Електричне поле підземної комунікації має дві складові: поздовжню, спрямовану вздовж провідника, і радіальну, яка обумовлена витіканням

частини струму з комунікації в ґрунт через неідеальну ізоляцію. Поздовжня складова порівняно слабко залежить від провідності ізоляції та ґрунту і наявності пошкоджень ізоляції. Тому вона практично непридатна для виявлення місць таких пошкоджень. Струми, які витікають з комунікації, течуть поблизу неї спочатку перпендикулярно осі провідника, а потім змінюють напрямок і прямують до ґрунтового електрода, з допомогою якого здійснюється подача змінного струму від спеціалізованого генератора. Якщо після знаходження осі електричну штирову антену розташувати поблизу поверхні землі перпендикулярно цій осі, то її сигнал буде фактично пропорційний різниці напруг між двома точками на поверхні землі. Якщо середину антени розташувати прямо над віссю провідника, то її вихідний сигнал повинен дорівнювати нулю у зв'язку з симетрією поля (на практиці цієї симетрії може не бути через неоднорідність ізоляції та ґрунту з точки зору провідності, і якийсь сигнал все-таки з'явиться). Максимум сигналу спостерігатиметься на певній відстані від осі при пересуванні антени в горизонтальній площині над поверхнею ґрунту, а при подальшому віддаленні сигнал спадатиме до нуля. Розташувавши антену на цій знайденій відстані перпендикулярно до осі і пересуваючи її уздовж комунікації, можна виявляти місця пошкоджень ізоляції. У цих місцях різко зростає струм витікання з комунікації. При цьому різниця напруг під електричною антеною і сигнал з неї суттєво зменшуються, що добре підтверджується практикою. Через значну залежність у даному випадку електричного поля від провідності ізоляції, ґрунту та розмірів дефекту й антени справедливо вважати, що здійснюється індикація зміни величини електричного поля, а не його вимірювання.

Для реалізації описаного принципу використовують антену 1, сигнал з якої через треті канали послідовно з'єднаних блоків 7, 11 і 13 подається на стрілковий індикатор 18.

4. ОСОБЛИВОСТІ АТЕСТАЦІЇ І ПЕРЕВІРКИ СИСТЕМИ ІМК-5

Як видно з вищеописаного принципу дії розробленої системи, вона призначена, в основному, для знаходження підземних лінійних струмопровідних комунікацій (кабелів зв'язку та енергопостачання, нафто-, газо- та продуктопроводів) і визначення глибини їх розташування. Відомо, що для нескінченно довгого провідника зі струмом $I(t)$ напруженість магнітної складової випромінюваного ним електромагнітного поля визначається з рівняння (2).

Тому для атестації даної системи найбільш переконливим і, напевне, найточнішим є метод атестації на експериментальній базі, яка складається із закопаних у ґрунт на заданих глибинах необхідної кількості протяжних кабелів і труб зі штучними пошкодженнями в конкретних місцях ізоляційного покриття. Вимірюючи координати цих комунікацій приладами, які підлягають атестації, і порівнюючи отримані результати з відомими, можна судити про придатність приладу до експлуатації.

Цей метод вимагає використання значної території, на якій відсутні сторонні протяжні струмопроводи, і для його реалізації потрібні значні капіталовкладення.

Для атестації приладів, що реалізують рівняння

$$h = \frac{aH_2}{H_1 - H_2}, \qquad (6)$$

яке випливає з рівнянь (2), можна було б використовувати довгий, заземлений з однієї сторони провідник, по якому від спеціалізованого генератора протікає струм відомої амплітуди. Але при цьому починають впливати поля, обумовлені розтіканням у ґрунті зворотного струму. У залежності від структури ґрунту довжина провідника повинна бути значною (500–1000 м). До того ж при використанні довгого лінійного провідника потрібний малий опір заземлення.

Значно простіше вирішується задача калібрування приладів, призначених для пошуку й обстеження комунікацій з використанням прямокутної петлі, яка дає можливість створювати магнітне поле з просторовим розподілом, близьким до властивих лінійним провідникам.

Вирази для вертикальної H_Z і горизонтальної H_Y складових сумарної напруженості магнітного поля від чотирьох сторін прямокутної петлі зі струмом (рис. 3) у точці M, що розташована в площині $Y0Z$, можна записати згідно з [18] так:

$$H_Z = \frac{IA}{4\pi}\left(\frac{y}{\sqrt{\frac{A^2}{4}+y^2+z^2}}\left(\frac{1}{y^2+z^2}+\frac{1}{\frac{A^2}{4}+z^2}\right)- \right.$$

$$\left. -\frac{y+B}{\sqrt{\frac{A^2}{4}+(y+B)^2+z^2}}\left(\frac{1}{(y+B)^2+z^2}+\frac{1}{\frac{A^2}{4}+z^2}\right)\right), \quad (7)$$

$$H_Y = \frac{IAz}{4\pi}\left(\frac{1}{(y+B)^2+z^2}\frac{1}{\sqrt{\frac{A^2}{4}+(y+B)^2+z^2}}- \right.$$

$$\left. -\frac{1}{y^2+z^2}\frac{1}{\sqrt{\frac{A^2}{4}+y^2+z^2}}\right), \quad (8)$$

де A і B – довжини сторін петлі.

На практиці доцільно використовувати два можливих варіанти розташування датчиків відносно петлі: над однією зі сторін (коли вимірюються горизонтальні складові поля) і зовні петлі (коли датчики розташовуються на поверхні землі або разом з нею підняті на певну висоту над землею). В останньому випадку вимірюються вертикальні складові поля.

Формули (7) і (8) спрощуються для цих варіантів до вигляду

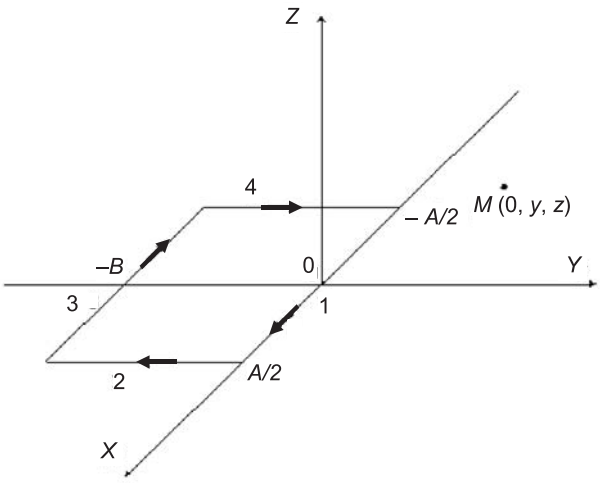

Рис. 3. Схема для розрахунку магнітного поля прямокутної петлі

$$H_{Z_0} = \frac{IA}{4\pi}\left(\frac{y}{\sqrt{\frac{A^2}{4}+y^2}}\left(\frac{1}{y^2}+\frac{1}{\frac{A^2}{4}}\right)- \right.$$

$$\left. -\frac{y+B}{\sqrt{\frac{A^2}{4}+(y+B)^2}}\left(\frac{1}{(y+B)^2}+\frac{1}{\frac{A^2}{4}}\right)\right), \quad (9)$$

$$H_{Y_0} = \frac{IAz}{4\pi}\left(\frac{1}{B^2+z^2}\frac{1}{\sqrt{\frac{A^2}{4}+B^2+z^2}}- \right.$$

$$\left. -\frac{1}{z^2}\frac{1}{\sqrt{\frac{A^2}{4}+z^2}}\right). \quad (10)$$

З аналізу цих виразів видно, що складність відтворення поля, близького до поля нескінченно довгого провідника, обумовлена не тільки обмеженістю розмірів петлі, але й тим, що на сумарне поле впливають віддалені фрагменти петлі, чиї поля спрямовані у напрямку, протилежному до того, який має по-

ле, утворене найближчою до датчиків стороною петлі.

Із порівняння (9) і (10) випливає, що горизонтальна компонента краще відтворює магнітне поле дуже довгого провідника. З іншого боку, при використанні горизонтальної компоненти для дослідження поля на значних відстанях від джерела виникають труднощі, пов'язані з необхідністю піднімати вимірювальні датчики на таку висоту, при якій працювати з ними практично неможливо. Іншим недоліком застосування горизонтальної компоненти є очевидна (хоч і незначна) несиметричність поля відносно фрагменту петлі 1, викликана тим, що єдине джерело завади (фрагмент 3) знаходиться з одного боку від фрагменту 1, який в основному формує поле, що моделює поле безмежно довгого провідника зі струмом. Це вносить додаткову похибку при перевірці здатності інформаційно-вимірювальної системи знаходити вісь провідника.

Існує певне оптимальне значення співвідношення між сторонами петлі, при якому похибка досягає мінімального значення (по модулю). Однак це значення мало виражене. Крім того, максимум залежить від загальної довжини петлі (чим більша довжина, тим ближчий максимум до співвідношення сторін, що дорівнює одиниці) і від відстані h (її зменшення дещо збільшує це співвідношення). Тому практично недоцільно шукати оптимальне співвідношення між сторонами; можна завжди застосовувати квадратну петлю. Необхідність використання неквадратної петлі може виникнути хіба що у зв'язку з труднощами при виборі майданчика, на якому її розкладатимуть.

Значно суттєвішим є вибір загальної довжини петлі. На перший погляд може здаватися, що це не так уже й важливо. Дійсно, якщо нам треба вимірювати поле на відстані h_1 від безмежно довгого провідника, то можна з отриманих вище формул знайти відстань від петлі h_2, на якій напруженість магнітного поля матиме таке ж значення. При цьому розміри петлі начебто не мають значення. Але всі розрахунки поля як для безмежно довгого провідника, так і для петлі велися за умови, що при його вимірюванні розмірами датчика можна знехтувати. Оскільки ж реальний датчик має скінченні розміри, то з'являється певна похибка, обумовлена тим, що вздовж вимірювальної осі датчика поле дещо змінюється. Ця похибка – методична і не пов'язана з самою точністю вимірювання поля атестованою апаратурою. При вимірюванні поля реального об'єкта нею нехтують. Однак при застосуванні петлі ця похибка дещо зросте через скінченність довжини основного джерела поля (фрагмента 1 петлі на рис. 3) і вплив трьох інших фрагментів петлі, які зменшують магнітне поле. Це додаткове зростання повинне бути настільки малим, щоб ним можна було знехтувати на фоні аналогічної похибки, яка виникає в полі безмежно довгого провідника. Цією умовою і визначається в значній мірі вибір розмірів петлі. Слід зазначити, що ця ж умова не дозволяє застосувати для атестації кільця Гельмгольца: їхні розміри повинні були б бути дещо більшими, ніж стандартна висота лабораторної кімнати. Виготовлення великих кілець Гельмгольца для роботи на відкритому майданчику явно недоцільне, бо застосування петель значно простіше.

Запропонована методика з прямокутною петлею стала основою при розробці програми метрологічної атестації (ПМА) створеної електромагнітної пошуково-вимірювальної системи ІМК-5. Розроблена ПМА складається з трьох розділів. У перших двох викладені ПМА генераторного й індикаторного блоків, а в третьому – ПМА системи в цілому.

Оскільки атестація і перевірка генераторного блока здійснюється згідно з загальновідомими методиками, які сформульовані у [19], то на ньому детально зупинятися не будемо. Докладніше розглянемо результати атестації

системи в цілому, специфіка якої обумовила необхідність наведеного вище в цьому розділі обґрунтування можливості застосування великих прямокутних петель зі струмом.

Розроблена ПМА перевірялася при випробуваннях виставочного зразка системи ІМК-5 у складі генератора сигналів ГС-2 та індикаторного блока на майданчику біля Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України, м. Львів.

Випробування складалися з етапів:

– визначення глибини пошуку окремої комунікації приладом ІМК-5 з робочою частотою 222 Гц шляхом вимірювання магнітного поля петлі в точках, які розташовані ззовні петлі біля сторони, протилежної стороні підключення генератора;
– оцінка основної похибки визначення глибини залягання комунікації від 0,3 м до 5 м приладом з основною робочою частотою 222 Гц;
– оцінка похибки визначення місця пошкодження ізоляції комунікації.

При проведенні випробувань використовували багатожильний провід МГШВ довжиною 200 м і вимірювальну рулетку довжиною 10 м. Схема випробувань наведена на рис. 4.

Для випробувань на рівному майданчику біля ФМІ НАНУ на опорах висотою 0,5 м піднімалася прямокутна петля (довжина сторін – $A \times B$ = 40×45 м) з мідного дроту з поперечним перерізом 1,5 мм^2. До петлі під'єднувався генератор ГС-2, з виходу якого в неї подавався змінний струм частотою 222 Гц з наповненням кожного десятого періоду частотою 10 кГц (остання частота призначена для виявлення пошкоджень за допомогою дослідження електричної складової поля).

Для визначення глибини пошуку окремої комунікації індикаторний блок приладу ІМК-5 на опорах встановлювався в площині петлі так, щоб осі приймальних котушок були перпендикулярні до сторони петлі, як показано на рисунку. При віддаленні приладу ІМК-5 від петлі було встановлено, що на виміряній рулеткою відстані 5 м при положенні перемикача "НАПРУГА" на генераторі ГС-2 на мітці "20 В", тобто при діючому значенні струму в петлі 3 А на частоті 222 Гц, у головних телефонах був стійкий звуковий сигнал, який пропадав при повороті приладу ІМК-5 на 90° – паралельно зовнішній стороні петлі. Це означає, що прилад ІМК-5 надійно знаходить комунікацію на глибині 5 м.

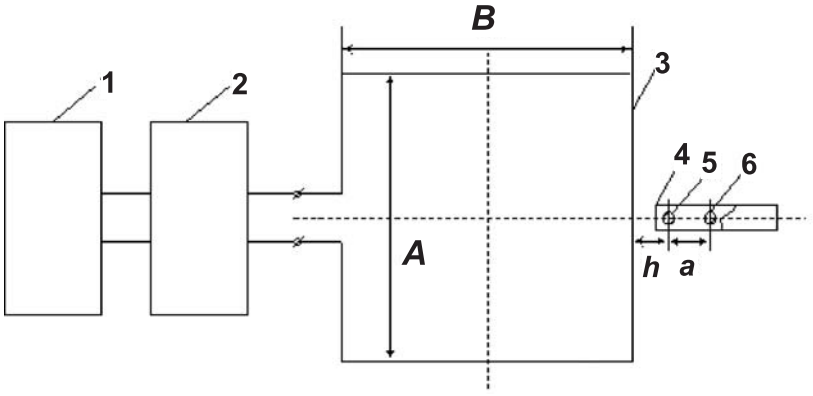

Рис. 4. Схема випробування системи ІМК-5: 1 – джерело живлення (акумулятор); 2 – генераторний блок ГС-2 системи ІМК-5; 3 – прямокутний провідник (петля) із струмом $I(t)$ розмірами $A \times B$; 4 – індикаторний блок ІМК-5; 5 і 6 – ближня і дальня приймальні індукційні котушки в блоці 4

Для проведення оцінки похибки визначення глибини залягання комунікації прилад калібрувався на виміряній рулеткою відстані $h_{дій}$ = 3,5 м згідно з таблицею, у якій наведені значення глибини $h_{роз}$, розраховані за (9) напруженості магнітного поля прямокутної петлі з довжинами сторін $A \times B$ = 40×45 м. Після калібрування були отримані покази приладу ІМК-5 $h_{пр}$ при зміні відстані в діапазоні $h_{дій}$ від 0,3 м до 5 м. Ці значення $h_{пр}$ також заносилися в таблицю і порівнювалися з розрахунковими $h_{роз}$. Як видно з таблиці, покази цифрового індикатора на приладі ІМК-5 на відстанях до $h_{дій}$ = 5 м відрізняються від розрахункових значень $h_{роз}$ не більше 10 %.

При оцінюванні похибки виявлення місць пошкоджень ізоляції комунікації реєструвалася електрична складова поля від зовнішньої сторони петлі. Шляхом використання її поздовжньої і поперечної компонент було виявлено, що прилад добре відчуває ці складові на відстані до 1 м від петлі при положенні перемикача "НАПРУГА" на мітці "20 В", хоча індуктивний опір петлі на частоті 10 000 Гц приблизно в 50 разів більший, ніж на частоті 222 Гц. Зміна значення складових на 20 % була зафіксована при віддаленні блока на 0,5 м від кута прямокутної петлі, який використовувався як імітація місця пошкодження ізоляції комунікації.

Це означає, що прямокутні петлі значних розмірів можуть використовуватися для визначення характеристик як існуючих, так і створеної ЕМПВС. На сьогодні ці характеристики точніше можуть оцінюватися в реальних умовах на діючих трубопроводах шляхом порівняння зареєстрованих системою ІМК-5 значень глибини та місць пошкоджень з результатами шурфування (розкопки) цих місць або з використанням інших методик моделювання електромагнітних полів обстежуваних комунікацій.

5. ОСНОВНІ ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМИ ІМК-5

Загальний вигляд системи ІМК-5 показаний на рис. 5.

Система ІМК-5 призначена для визначення осі, глибини залягання та місць пошкодження ізоляції підземних комунікацій шляхом вимірювання параметрів магнітної та електричної складових випромінюваних ними електромагнітних полів.

Технічні дані індикаторного блока:

- глибина виявлення комунікації – до 5 м;
- похибка визначення глибини залягання комунікації – не більше ± 10 %;
- робочі частоти – 50, 100 і 222 Гц;
- живлення – 8,4 В ± 10 % від одної акумуляторної батареї 7D-0,125D;
- похибка виявлення місця пошкодження ізоляції на глибині до 1 м – не більше ± 0,5 м.

Технічні характеристики генераторного блока ГС-2:

- вихідна потужність – не більше 100 ВА;
- основна частота вихідного сигналу –

Таблиця. Результати визначення похибки вимірювання глибини системою ІМК-5

$h_{дій}$, м	0,3	0,4	0,5	1,0	2,0	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
$h_{роз}$, м	0,3	0,4	0,5	0,9	1,8	2,6	3,0	3,3	3,6	4,0
$h_{пр}$, м	0,3	0,4	0,5	0,9	1,9	2,7	3,0	3,3	3,6	4,4
δ_h, %	0	0	0	0	5,6	3,8	0	0	0	10

222 Гц з високочастотним наповненням кожного 10-го періоду;
- високочастотна складова вихідного сигналу – 10 кГц;
- нестабільність частот – не більше 1 %;
- діапазон зміни вихідної напруги – від 10 до 60 В з дискретністю 10 В;
- живлення від акумулятора – 12 В, ємністю 18 А год.

Маса:
- генераторного блока ГС-2 – не більше 3,5 кг;
- індикаторного блока ІМК-5 – не більше 2,7 кг;
- індикаторної головки – не більше 0,3 кг.

Габарити:
- індикаторного блока без індикаторної головки – не більше 850×280×60 мм;
- генераторного блока – не більше 300×190×130 мм;
- індикаторної головки – не більше 90×85×42 мм.

6. ВИСНОВКИ

Описана електромагнітна пошуково-вимірювальна система ІМК-5 забезпечує одночасне визначення координат підземних комунікацій та місць пошкодження їх ізоляції безконтактним методом, тобто в порівнянні з відомими аналогами вона володіє більшими функціональними можливостями і є ефективнішою.

Визначення координат комунікації за різницевим сигналом від ближньої і віддаленої приймальних індукційних котушок забезпечує завадостійкість створеної системи при наявності біля обстежуваної інших комунікацій. Це дуже важливо при пошуку і обстеженні комунікацій у населених пунктах, де поруч можуть бути розташовані тепло-, водо- та газопроводи, лінії електропередач і зв'язку тощо.

Наявність у системі вузла калібрування

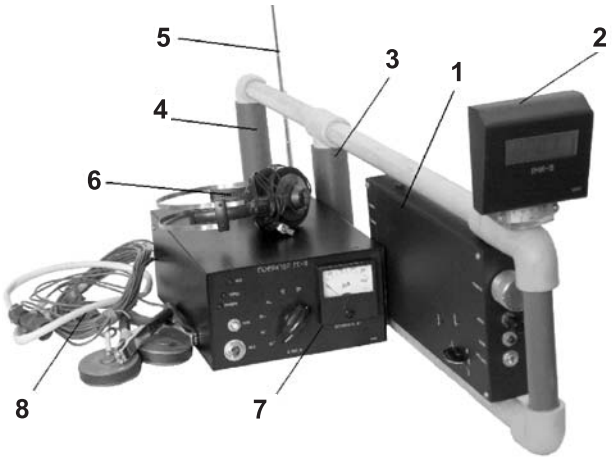

Рис. 5. Електромагнітна пошуково-вимірювальна система ІМК-5: 1 – індикаторний блок ІМК-5 з індикаторною головкою 2, магнітоприймачами 3 і 4 та телескопічною антеною 5; 6 – головні телефони; 7 – генераторний блок ГС-2; 8 – з'єднувальні кабелі

дає можливість оперативно калібрувати і перевіряти роботу всього індикаторного блока як у лабораторних (зокрема, при налагодженні та проведенні кліматичних випробувань), так і в польових умовах.

Розроблена система може ефективно застосовуватися в нафтовій і газовій промисловості, комунальному господарстві, енергетиці, зв'язку тощо. Зокрема, вона вже впроваджена у ВАТ "Львівгаз", Дубненському та Березненському УЕГГ ВАТ "Рівнегаз", ВАТ "Тисменицягаз". Результати польових випробувань на діючих газопроводах ВАТ "Львівгаз" і ВАТ "Тисменицягаз" підтверджують ефективність використання створеної системи, особливо під час пошуку і виявлення місць пошкоджень ізоляції безконтактним методом.

Розроблена ескізна і робоча конструкторська та експлуатаційна документація, а також програма метрологічної атестації створеної системи дають можливість (при наявності замовлень від зацікавлених підприємств) здійснити виготовлення на ДП "Львівський дослідний завод НАН України" необхідної кількості її комплектів.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Гордиенко В. И., Убогий В. П., Ярошевский Е. В.** Электромагнитное обнаружение инженерных коммуникаций и локальных аномалий. – К.: Наук. думка, 1981. – 227 с.
2. **Бахмутский В. Ф., Зуенко Г. И.** Индукционные кабелеискатели. – М.: Связь, 1970. – 112 с.
3. **Плахтий А. К.** Приборы и методы поиска подземных сооружений при выполнении инженерно-геодезических работ. – М.: Недра, 1969. – 74 с.
4. Строительство кабельных сооружений связи: Справочник. / Д. А. Барон, И. И. Гроднев, В. Н. Евдокимов и др. – М.: Радио и связь. – 768 с.
5. А. с. 1471138 (СССР). МКИ4 G01V3/10. Бесконтактный измеритель тока в трубопроводе. / Р. М. Джала, Б. Я. Вербенец. – Опубл. 07.04.1989, Бюл. № 13.
6. **Григорович К. К., Ягола Г. К.** Методы и средства оценки состояния изоляционных покрытий подземных трубопроводов. // Коррозия и защита в нефтяной промышленности. М., 1979. – № 9. – С. 17–20.
7. **Драбич П. П.** Поиск и обследование протяженных электропроводящих коммуникаций. // Измерительная техника. М., 1996. – № 3. – С. 56–58.
8. **Драбич П. П.** Электромагнитная система определения координат подземных инженерных коммуникаций. // Метрология: приложение к журналу "Измерительная техника". М., 1996. – № 7. – С. 14–23.
9. Патент 2119094 (Великобританія). МПК^4 G01V3/10. Пристрій для вимірювання дефектів у ізоляційних покриттях. / П. Таймен, Р. Тутер. – Опубл. 09.11.1983.
10. Патент 2070783А (Великобританія). МПК^4 R19/00. Вимірювання струму в провіднику. / М. І. Хауелл, Е. Дуглас, С. Чаммерс. – Опубл. 09.09.1981.
11. **Джала Р. М.** Електромагнітні обстеження і контроль корозії трубопроводів. // Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довідн. посібник. / Під загальною ред. В. В. Панасюка. – Т. 5: Неруйнівний контроль і технічна діагностика. / Під ред. З. Т. Назарчука. – Львів: ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України. – 2001. – Розд. 5. – С. 263–330.
12. **Драбич П. П., Драбич О. П., Стецько І. Г.** Електромагнітні прилади і системи пошуку і обстеження підземних магістральних трубопроводів. / Ринок інсталяційний. – Львів: ЕКОінформ. – Вип. 09. – 2001. – С. 17–19.
13. Патент 15042А (Україна), МПК 5G01V3/10. Глибиномір. / О. А. Вакульський, П. П. Драбич, В. Г. Дума. – Опубл. 30.06.1997 р., Бюл. № 3.
14. Патент 10884А (Україна), МПК 5G01V3/10, H03K3/84. Генератор для пошуку і обстеження підземних комунікацій. / П. П. Драбич. – Опубл. 25.12.1996 р., Бюл. № 4.
15. Деклараційний патент 55043А (Україна), МПК 7G01R19/00, G01R33/02, G01V3/10. Багатоканальна пошуково-вимірювальна система. / Ю. В. Банахевич, П. П. Драбич, О. П. Драбич, А. О. Кичма, Р. І. Коваль, І. Г. Стецько, І. М. Яворський. – Опубл. 17.03.2003 р., Бюл. № 3.
16. Заявка на винахід 2004032144 (Україна), МПК 7G01V3/10, H03K3/84. Пристрій для збудження в струмопровідних комунікаціях електромагнітного поля складної форми. / П. П. Драбич, О. П. Драбич, П. Б. Дуб, І. Г. Стецько. – Опубл. 17.10.2005 р., Бюл. № 10.
17. **Драбич П. П., Драбич О. П., Стецько І. Г.** Електромагнітна пошуково-вимірювальна система ІМК-5. / Праці сьомої Всеукраїнської міжнародної конференції "Оброблення сигналів і зображень та розпізнавання образів" (УкрОБРАЗ'2004). – Київ: Міжнародний наук.-навч. центр інформ. технологій та систем. 11–15 жовтня 2004 р. – С. 271–272.
18. **Дикмарова Л. П.** Анализ геометрии установок индуктивных методов электроразведки. – К.: Наук. думка, 1968. – 158 с.
19. ГСТУ 45.004-97. Обладнання трасопошукові. Загальні технічні умови. – Київ: Держкомзв'язку України, 1997 р. – 13 с.

Надійшла до редакції 12.12.05