

ЕЛЕКТРОМАГНЕТНИЙ МЕТОД І ЗАСОБИ БЕЗКОНТАКТНИХ ОБСТЕЖЕНЬ ПРОТИКОРОЗІЙНОГО ЗАХИСТУ ПІДЗЕМНИХ ТРУБОПРОВІДІВ

Р. М. ДЖАЛА, Б. Я. ВЕРБЕНЕЦЬ

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

Запропоновано триєдину математичну модель електромагнетного поля, розвинуто засоби оперативних безконтактних обстежень підземних трубопроводів (ПТ). Розроблено способи і прилади для визначення розподілу струму катодного захисту та перехідного опору захисних покривів на різних ділянках ПТ. Описано технологію інтегральних, диференціальних та локальних обстежень магістральних трубопроводів.

Ключові слова: *трубопровід підземний, контроль захисту від корозії, електродинамічна модель, безконтактні мірювання струму, прилади.*

Підземні трубопроводи (ПТ) відіграють важливу роль у промисловості і побуті та є важливим стратегічним чинником народногосподарського комплексу держави, її національної безпеки. У різних регіонах світу налічують біля 2 mln. km трубопроводів, якими транспортують газ, нафту, сировину і продукти хімічної промисловості.

Впливи середовища призводять до корозійних пошкоджень, які спричиняють втрати і перебої в постачанні транспортованих продуктів, забруднення довкілля, аварії та катастрофи. Їх ліквідація потребує значних витрат. Щоб запобігти незворотним корозійним пошкодженням потрібно вчасно і у відповідних місцях налагоджувати протикорозійний захист, що вимагає періодичних обстежень.

В Україні діє розгалужена мережа трубопровідного транспорту. Газотранспортна система налічує понад 37 000 km магістральних газопроводів, 182 компресорні станції та цехи, 13 підземних сховищ газу, більше 1600 газорозподільних станцій та інші допоміжні об'єкти. Розвинена мережа понад 260 000 km газопроводів низького тиску в населених пунктах. Функціонує близько 4500 km магістральних нафтопроводів. Використовують продуктопроводи, більше 570 km магістральних аміакопроводів. Сталеві трубопроводи широко застосовують для водопостачання населення і підприємств та для зрошувальних систем. Крім цього, діє розвинена мережа підземних кабелів для передачі електроенергії та зв'язку.

Лінійна частина газопровідної системи України найстаріша в Європі. За терміном експлуатації газопроводи характеризують так: до 10 років – 36%; 10...20 років – 30%; 20...30 років – 16%; більше 30 років – 18%, у тому числі 1% – понад 50 років. Аварійність газопроводів з причин корозії становить біля 27% і з часом зростає аж до непридатності споруди для подальшого використання. Для підвищення надійності та продовження термінів експлуатації трубопроводів застосовують протикорозійний захист (ПКЗ).

У результаті численних досліджень і практики тривалої експлуатації вироблено комплексний метод захисту від корозії ПТ: ізоляційними покриттями і катодною поляризацією. Проте ізоляційні покриття під час спорудження та експлуатації під впливом агресивного середовища руйнуються, старіють, зазвичай, скорі-

ше від металу. Змінюється з часом і електродинамічна ситуація вздовж траси. Це вимагає періодичного контролю стану захисту від корозії з метою обґрунтованого планування своєчасного ремонту для запобігання пошкоджень і аварій. Особливу увагу проблемі діагностичних обстежень технічного стану ПТ приділяють і тому, що багато потенційно небезпечних магістральних трубопроводів високого тиску прокладено на густо населеній території.

Задача ускладнена відсутністю прямого доступу до поверхні ПТ, великою протяжністю трубопроводів, наявністю завад і неоднорідністю умов вздовж траси. Неоднорідність характеристик середовища та зміни їх з часом спричинюють нерівномірність протікання корозійних процесів у різних місцях траси. Тому особливо важливим є своєчасне виявлення найімовірніших місць корозії.

Тут подаємо короткий огляд науково-технічних розробок методів і засобів діагностичних обстежень стану ПКЗ підземних трубопроводів, виконаних у ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України [1–17] та окреслимо їх місце у загальній сучасній системі обстежень трубопроводів.

Актуальність розвитку системи обстежень трубопроводів. Для обстежень, контролю, діагностики і моніторингу технічного стану магістральних трубопроводів використовують інформаційно-вимірвальні системи (ІВС), які поділяють на три типи [16]: стаціонарні, польові та внутрішньотрубні. Стаціонарні ІВС реалізують системами давачів, розміщених у певних точках траси і зв'язаних з диспетчерським пунктом. Вони інформують лише про стан трубопроводу в окремих точках траси. Внутрішньотрубну дефектоскопію металеві стінки труби реалізують спеціальними магнетними чи ультразвуковими системами (пристроями відбору і накопичення вимірвальної інформації), які пропускають по трубопроводу з потоком транспортованого продукту. Виявляють лише вже наявні пошкодження металу труби, але не отримують потрібної інформації про захист від корозії. Тому необхідні обстеження стану зовнішньої поверхні труби (ізоляції, електричної поляризації) та середовища. Найбільше інформації про ПКЗ ПТ дають системи польових експедиційних обстежень, серед них виділяють контактні та безконтактні [1, 2, 16].

Традиційно для корозійних обстежень застосовують контактні електрометричні методи, які достатньо прості як по суті, так і в інструментальній реалізації. Проте їх продуктивність обмежується трудомісткістю забезпечення достатньої кількості надійних контактів вимірвальних електродів з трубою і землею. Крім того, в електрометрії використовують тільки частину інформації, що є в електричному полі. Магнетне поле найчастіше використовували для визначення розміщення трубопроводів.

Безконтактні ж електромагнетні методи обстежень за мобільністю, продуктивністю й інформативністю переважають традиційні контактні методи. Але вони потребують спеціальних засобів вимірювань і не мають широкого застосування. Для їх реалізації актуальні комплексні дослідження інформативних ознак поля і вимірвальних сигналів, створення алгоритмів, засобів вимірювань і опрацювання інформації. Розв'язання цієї проблеми пов'язане, насамперед, з розвитком математичної моделі для вивчення взаємозв'язків просторових і частотних характеристик електромагнетного (ЕМ) поля з параметрами об'єкта та вибору на цій основі вимірюваних характеристик поля і створення відповідного апаратурного та методичного забезпечення.

Триєдина математична модель ЕМ поля трубопроводу. На основі попередніх розробок теорії електромагнетного поля циліндричних структур запропоновано триєдину математичну модель (ТЄММ) ЕМ поля підземного сталевого ізольованого трубопроводу [1–6], яка базується на розв'язках крайових задач

електродинаміки, теорії електричних кіл з розподіленими параметрами та теорії розподілу поля струмів об'ємних провідників (рис. 1).

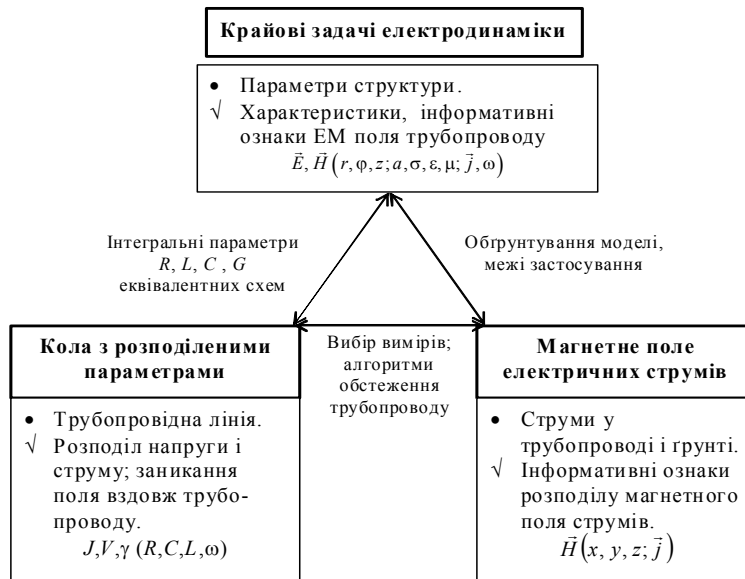


Рис. 1. Структура триединої математичної моделі ЕМ поля ПТ.

Fig. 1. The triune mathematical model of underground pipeline electromagnetic field.

З електродинамічної точки зору сталевий ізольований ПТ (рис. 2) подано як циліндричну багат шарову структуру, електричні і магнетні компоненти поля якої [1] описуємо поздовжніми компонентами електричного Π^e та магнетного Π^m векторів Герца, що задовольняють рівняння Гельмгольца, до якого зводять рівняння Максвела. Змінне з частотою ω поле у кожній з підобластей структури подаємо розкладом по елементарних хвильових функціях виду

$$\Pi_{zl}^{e,m}(r, \varphi, z, \omega) = \int \sum_n R_n^{e,m}(v_l r) \cdot \Phi_n^{e,m}(\varphi) \exp(\pm i\gamma z) \exp(i\omega t) d\gamma, \quad (1)$$

де $v_l^2 = k_l^2 - \gamma^2$ – поперечні хвильові числа підобластей ($l = b, T, i, c$); $k_l = \sqrt{\omega^2 \varepsilon_l \mu_l - i\omega \mu_l \sigma_l}$ – хвильове число середовища; радіальні функції поля $R_n^{e,m}(v_l r)$ виражені комбінаціями функцій Бесселя за граничними умовами і описують електромагнетні та метричні параметри структури; постійні поширення γ визначає дисперсійне трансцендентне рівняння, яке зводимо до рівності радіальних адмітансів на поверхні труби [1, 2],

$$Y_r^{b\Gamma}(\gamma) = Y_r^{ic}(\gamma) \text{ при } r = a_T, \quad (2)$$

де a_T – зовнішній радіус труби.

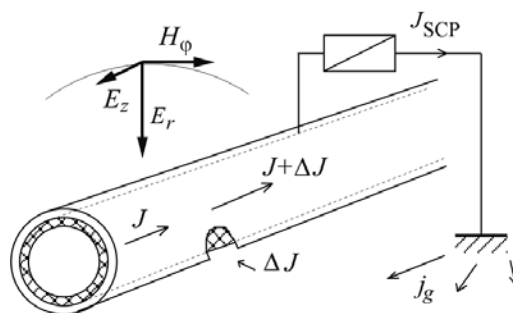


Рис. 2. Підземний трубопровід з ізоляційним покритвом і установкою катодного захисту. Компоненти ЕМ поля струму трубопровідної лінії.

Fig. 2. Underground pipeline with insulation coating and station of cathodic protection (SCP). Electromagnetic field components of a pipeline.

Поле поширюється вздовж трубопроводу, в основному, у вигляді квазі-ТЕМ-хвилі, яка існує за всіх (у т. ч. і нульової) частот. Це дає змогу подавати трубопровід з оточенням (землею) довгою лінією, розподілені параметри якої R , L , C , G визначають на основі розв'язків крайових задач електродинаміки [1, 5]. Залежності поширення поля від параметрів структури досліджують з допомогою еквівалентних електричних схем заміщення, які наглядно подають електромагнетні процеси і полегшують їх аналіз.

Для природних ґрунтів, яким властиві немагнетність і невисока електропровідність за частот, менших 1500 Hz, створене струмом ПТ магнетне поле, яке, згідно з виразом (1), на малих відстанях від труби (у зоні вимірювань) описує формула

$$H_{\phi} = \frac{J_0}{2\pi r} \exp(i\omega t - i\gamma z) \quad \text{при } |v_{cr}| \ll 1, \quad (3)$$

що дає підставу для моделювання ПТ лінійними струмопроводами.

Основою ТЕММ є теорія ЕМ поля циліндричних структур. Проте складність об'єкта призводить до громіздких розв'язків, тому методологічно доцільно розглядати спрощені моделі (еквівалентні схеми, лінійні струми). Так, характеристики просторового розподілу МП струмів є основою для вибору вимірюваних параметрів (вхідних величин) та побудови алгоритмів і систем безконтактних вимірювань струмів (БВС) і координат ПТ. ТЕММ дає можливість ефективно досліджувати електромагнетні явища, пов'язані з корозійним станом ПТ, полегшує виявлення і аналіз інформативних ознак ЕМ поля та розробку методів і систем обстежень ПКЗ, є теоретичною основою ЕМ ІВС.

ЕМ поле багат шарової циліндричної структури з локальним дефектом та двох паралельних ізольованих трубопроводів описуємо рівняннями гібридних хвиль [1–4]. Показано наявність та досліджено характер еліптичної поляризації поля комунікацій з несинфазними струмами. Проаналізовано просторові і частотні характеристики поля струму низької частоти, що протікає вздовж трубопроводу (рис. 3 і 4) та струму витікання з ПТ [1–7].

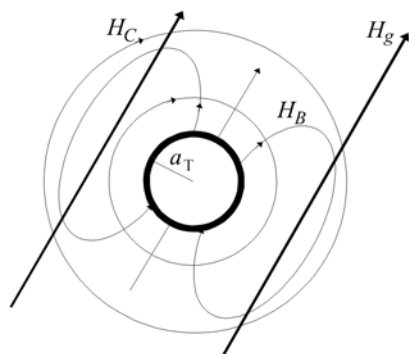


Рис. 3. Fig. 3.

Рис. 3. Вторинне магнетне поле труби H_B у геомагнетному полі H_g та магнетне поле струму H_C , що протікає вздовж трубопроводу.

Fig. 3. Secondary magnetic field of pipe, H_B , in geomagnetic field, H_g , and magnetic field of a pipeline current, H_C .

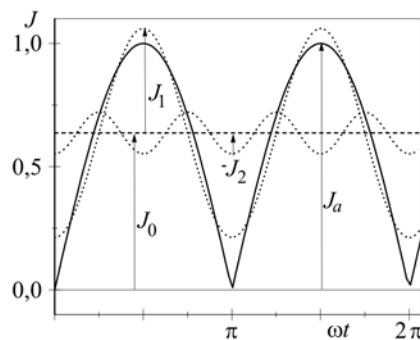


Рис. 4. Fig. 4.

Рис. 4. Випрямлений пульсуючий струм $J(t)$ з амплітудою J_a та його компоненти: середнє значення J_0 та перша і друга парні гармоніки з амплітудами J_1 і J_2 .

Fig. 4. The pulsating current, $J(t)$, with amplitude, J_a , and its constituents: mean value, J_0 , and the first and the second harmonics with amplitudes, J_1 , and, J_2 .

На основі ТСММ досліджено взаємозв'язки між геометричними та електричними параметрами ПТ і характеристиками його ЕМ поля, визначено інформативні ознаки та діапазони вимірюваних величин. Проведено аналіз феноменологічної електричної схеми трубопровідної лінії, побудовано спрощені еквівалентні схеми для частинних випадків постійного і змінного струму, запропоновано спосіб оцінки площі пошкодження ізоляції ПТ [1, 5]. Розраховано залежності характеристики розподілу і поширення ЕМ поля трубопроводу від його параметрів, стану ізоляції та електропровідності середовища. Встановлено потрібні параметри вимірювальних перетворювачів і пристроїв [8–12], побудовано алгоритми опрацювання вхідних сигналів та визначення вимірюваних величин (струмів, електричних напруг, опорів) як носіїв інформації для оцінки стану протикорозійного захисту ПТ [11–15].

Теоретично і експериментально досліджено розподіл постійного магнетного поля на трасі ПТ. Отримано формулу дипольного моменту m_T вторинного поля намагнення труби

$$m_T = 2\pi a_T^2 \frac{(1-t)(\mu^2-1)}{(\mu+1)^2 - t(\mu-1)^2} \mu H^3, \quad \vec{H}_B = \frac{m}{2\pi\mu r^2} (\vec{r}_0 \cos\varphi + \vec{\varphi}_0 \sin\varphi). \quad (4)$$

Тут t – квадрат відношення внутрішнього до зовнішнього a_T радіусів труби; μ – відносна магнетна проникність металу труби (сталі). Показано, що для вимірювань постійного струму, меншого 50 А, необхідно враховувати вторинне геомагнетне поле ПТ H_B (рис. 3). Виявлено причини негативних результатів попередніх розробок і запропоновано способи 6, 7 (рис. 5) розв'язання цієї задачі [1, 2].

Безконтактні мірвання струмів. Розвинуто теоретичні основи методу безконтактних вимірювань струмів як базу для проектування систем вхідних перетворювачів апаратури БВС ПТ [8–11]. Серед диференціальних БВС виділено класи градієнтних і паралаксних методів, проведено аналіз і зіставлення їх інформативних, метрологічних, технологічних властивостей. Запропоновано нові методи БВС з азимутальною і радіальною орієнтаціями бази точок спостереження, з довільним розміщенням бази у поперечній струмопроводу площині (з компонентними і модульними первинними перетворювачами) (рис. 5), а також циклічний метод з переміщенням точки спостереження по коловій траєкторії. Показано можливість використання надлишкової інформації у вхідних даних для “внутрішньої” оцінки похибок вимірювань координат і струму.

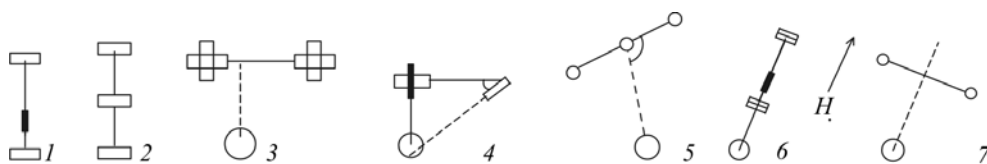


Рис. 5. Способи БВС: 1, 2, 6 – радіальні; 4, 7 – азимутальні; 3, 5 – інваріантні; 2, 6 – різницеві.

Fig. 5. Methods of non-contact measurements of currents: 1, 2, 6 – radial; 4, 7 – azimuth; 3, 5 – invariant; 2, 6 – differential.

Запропоновано низку нових способів і пристроїв БВС. Для оперативних обстежень ПТ з метою запобігання їх пошкоджень розроблено апаратуру БІТ-КВП [10–12] (рис. 6а), що визначає місце, напрям і глибину залягання трубопроводів і струмопровідних комунікацій та вимірює струм з корекцією рельєфної похибки без підключення до трубопроводу і землі; додатково споряджена вольтметром для традиційних контактних вимірювань і електронною пам'яттю. Результати ви-

мірювань через інтерфейс за допомогою спеціальної програми переводять у персональний комп'ютер для автоматичного опрацювання і документування.



Рис. 6. Комплект апаратури БІТ-КВП для безконтактних вимірювань струму ПТ з корекцією відстані, з вольтметром і пам'яттю (а) та безконтактний вимірювач струмів і глибини залягання ПТ БВС-1 (b).

Fig. 6. A set of БІТ-КВП equipment for the non-contact measurements of current of underground pipelines with the distance correction, and a voltmeter and memory (a) and also non-contact measuring device of currents and location depth of БВС-1 underground pipeline (b).

Серію приладів типу БІТ-К виготовлено на Дослідному заводі ФМІ і передано за договорами для обстежень магістральних трубопроводів газу, нафти, аміаку, етилену, води та інших підземних комунікацій в Україні та за кордоном. Розроблено зразок нової апаратури БВС (рис. 6b) з покращеними експлуатаційними характеристиками [11].

На запит практики створено портативні прилади типу ОРТ для визначення розміщення трубопроводів і дистанційного контролю роботи установок катодного захисту (УКЗ) [12]; налагоджено серійний випуск ОРТ-1. Для контролю електрохімічного захисту від корозії підземних споруд розроблено портативні вимірювачі потенціалів ВП та комплексні портативні прилади типу ОРТ+В. Для регулярних обстежень – вимірювань глибини залягання ПТ та електричних потенціалів, розроблено прилад МГВ [16]. Створені прилади добре зарекомендували себе у виробничих умовах на трасах ПТ, отримали позитивні відгуки спеціалістів. Розроблення і виготовлення їх у ФМІ стримує експансію зарубіжних приладів в Україну, сприяє розвитку вітчизняного приладобудування у цій галузі.

Технологія обстежень підземних трубопроводів безконтактним методом.

Створено нові засоби і розвинуто методи визначення параметрів ізоляційного покриття і електрохімічного захисту від корозії сталевих ПТ, запропоновано технологію безконтактних інтегральних (рис. 7), диференційних (рис. 8 і 9) та локальних обстежень ПКЗ ПТ за БВС з раціональним використанням контактної електрометрії [11, 13–17]. Розроблено методи визначення розподілу вздовж траси струму катодного захисту, перехідного опору труба–земля та його складників (грунту, ізоляції, поляризації) [11–16]. Запропоновано і перевірено в натурних умовах (рис. 9) новий критерій виявлення незадовільної ізоляції ПТ [11, 14], за яким перевищення відносними витратами струму критичного значення

$$\delta J_{cr} = 0,2\sqrt{f/\rho_g}, \% / m \quad (6)$$

вказує на незадовільний стан ізоляції у відповідних ділянках ПТ.

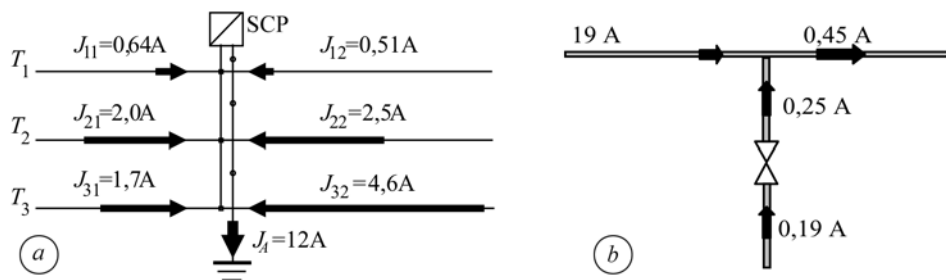


Рис. 7. Розподіл струму УКЗ між плечами і гілками трьох ПТ (а) та на відгалуженні ПТ (b).

Fig. 7. Distribution of SCP currents between arms and branches of three pipelines (a) and on the pipeline branch (b).

Рис. 8. Розподіли струму УКЗ J , глибини залягання труби h , витрат струму ΔJ , відносного нагикання струму $\Delta J/J\Delta z$ та перехідного опору R_n ПТ за БВС апаратурую БІТ-КВП.

Fig. 8. Distribution of current of SCP, J , depth of pipe location, h , current loss, ΔJ , relative current charging, $\Delta J/J\Delta z$, and transitional resistance, R_n , along the pipeline by БІТ-КВП device.

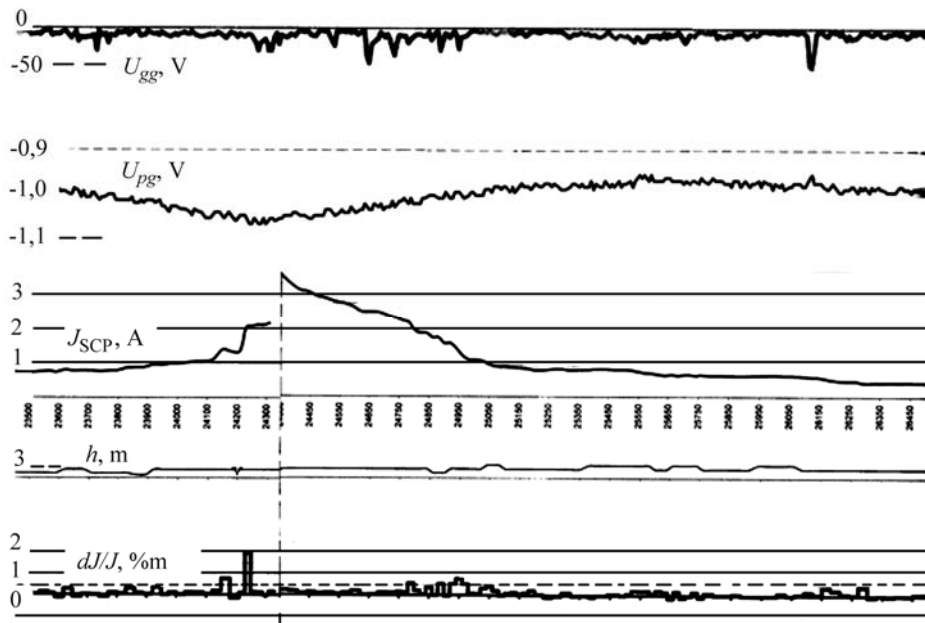
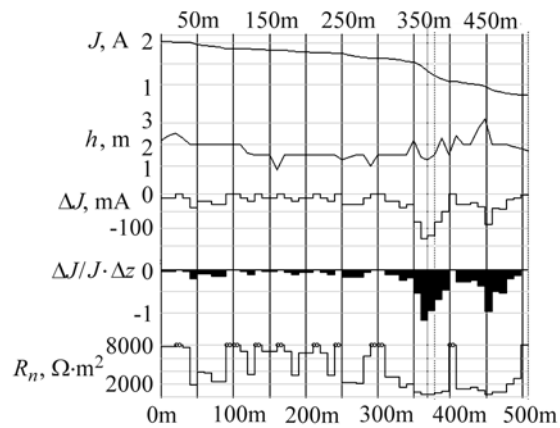


Рис. 9. Результати обстеження магістрального газопроводу традиційним контактним U та новим безконтактним J, h методами. На нижньому графіку перевищення критичного зникання (штрихової лінії) вказують ділянки з незадовільною ізоляцією ПТ.

Fig. 9. Results of inspection of main gas pipeline by the traditional contact, U , and new non-contact, J, h methods. The areas of unsatisfactory insulation of the pipeline are illustrated on the lower graph of the exceeding critical attenuation (dashed region).

Досліджено можливості оцінювання розподілу витрат струму катодного захисту в ПТ за вимірами змінних компонент. Запропоновано принципово новий спосіб Джали визначення напрямку пульсуючого струму за його асиметрією і фазами гармонічних компонент [2], який втілено у спеціальний пристрій для безконтактного визначення напрямку струму УКЗ ПТ. Запропоновано встановлювати густину струму катодного захисту на ділянці ПТ за вимірами змінного струму та коефіцієнта гармоніки [13–16]. Розроблено спеціальну програму для комп'ютерного опрацювання безконтактних вимірів струмів ПТ [17].

ВИСНОВКИ

Розроблено науково-методичні основи побудови і застосування електромагнетної ІВС, що реалізує нові методи і засоби БВС, відбору і кількісної оцінки інформативних ознак ЕМ поля та визначення параметрів стану захованих струмопровідних комунікацій. Запропоновано і розвинуто концепцію обстежень стану ПКЗ ПТ методом БВС з першочерговими контактними вимірами в місцях аномально великих витрат струму катодного захисту. Розроблено методи і засоби відбору та автоматизованого опрацювання кількісної інформації від об'єкта до документа, якими започатковано новий напрям технології обстежень корозійного стану ПТ.

Створено електромагнетну інформаційно-вимірвальну систему з підвищеними оперативністю та інформативністю для контролю стану захисного ізоляційного покриття та параметрів електрохімічного захисту ПТ за безконтактними вимірами струмів. Розробки доведено до впровадження на підприємствах, які експлуатують ПТ, проводять їх обстеження і технічну діагностику, а також в інститутах відповідного профілю для підготовки молодих спеціалістів і науковців. Це стримує експансію зарубіжних приладів.

Інтеграція розробленої інформаційної технології (зі створеними засобами технічного і методичного забезпечення) у загальну систему ПКЗ підвищує оперативність та інформативність обстежень, дає можливість переходити від регламентного обслуговування до обслуговування чи ремонту за технічним станом для запобігання пошкоджень, підвищення надійності і продовження термінів експлуатації дорогих та важливих підземних трубопроводів і пов'язаних з ними споруд.

РЕЗЮМЕ. Предложено триединую математическую модель электромагнитного поля, развито средства оперативных бесконтактных обследований подземных трубопроводов. Разработано способы и приборы для определения распределения тока катодной защиты и переходного сопротивления защитных покрытий на разных участках ПТ. Описано технологию интегральных, дифференциальных и локальных обследований магистральных трубопроводов.

SUMMARY. The triune mathematical model of the electromagnetic field and facilities for non-contact observations of underground pipelines are proposed. Methods and devices for determination of cathode protection current distribution and transition resistance of protective coatings on different areas are proposed. The technology of integral, differential and local inspections of main pipelines is described.

1. Джала Р. М. Електромагнітні обстеження і контроль корозії трубопроводів // Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довідн. пос. / Під заг. 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. – С. 263–330.
2. Джала Р. М. Контроль захисту від корозії підземних трубопроводів безконтактним методом // Відбір і обробка інформації. – 2001. – Вип. 15 (91). – С. 142–153.
3. Джала Р. М. Електродинамічна модель трубопроводу з дефектом ізоляції // Там же. – 2000. – Вип. 14 (90). – С. 25–30.
4. Джала Р. М. Електродинамічна модель паралельних ізольованих трубопроводів // Радіоелектроніка та телекомунікації: Вісник ДУ “Львівська політехніка”. – 2000. – № 387. – С. 474–479.

5. Дикмарова Л. П., Джала Р. М. Математические модели подземных трубопроводов в задачах коррозионного контроля // Проблемы управления и информатики. – 2000. – № 1. – С. 54–63.
6. Джала Р. М. Електричне поле підземного трубопроводу: похибки електрометрії // Відбір і обробка інформації. – 2002. – Вип. 16 (92). – С. 5–8.
7. Вербенець Б. Я., Джала В. Р., Джала Р. М. Ефект витікаючого струму в безконтактних обстеженнях підземних трубопроводів // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. Вип. 12: Неруйнівний контроль та технічна діагностика матеріалів і конструкцій. – Львів: ФМІ НАНУ, 2007. – С. 83–86.
8. Джала Р. М. Метод безконтактних вимірювань струмів для контролю протикорозійного захисту підземних трубопроводів // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1999. – **35**, № 3. – С. 105–112.
(*Dzhala R. M. A Method of Noncontact Measurements of Currents for Control over Corrosion Protection of Underground Pipelines // Materials Science. – 1999. – **35**, № 3. – P. 418–426.*)
9. Джала Р. М. Безконтактні вимірювання струмів з корекцією відстані // Укр. метролог. журн. – 2000. – № 4. – С. 38–40.
10. Апаратура БІТ-КВП з комп'ютерною обробкою результатів обстежень підземних комунікацій / Р. Джала, Б. Вербенець, В. Джала, О. Сенюк // Вісник НУ “Львівська політехніка”: Комп'ютерні системи проектування. – 2001. – № 415. – С. 100–104.
11. Безконтактний метод і апаратура для оперативних обстежень підземних трубопроводів / Р. М. Джала, Л. П. Дикмарова, Б. Я. Вербенець, П. М. Хлипняк // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин. – К.: ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАНУ, 2006. – С. 57–61.
12. Джала Р., Вербенець Б. Пошук і обстеження підземних трубопроводів // Ринок інсталяцій. – 2001. – № 10. – С. 10–11.
13. Визначення параметрів корозійного стану ділянки підземного трубопроводу / Р. Джала, Л. Дикмарова, С. Савула та ін. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2006. – Спец. вип. № 5. – С. 305–309.
14. Технологія обстежень підземних трубопроводів з використанням безконтактних вимірювань струмів / Р. М. Джала, С. Ф. Савула, Б. Я. Вербенець та ін. // Методи та прилади контролю якості. – 2009. – № 22. – С. 22–27.
15. Визначення параметрів протикорозійного захисту підземних трубопроводів за безконтактними вимірами струму / Р. М. Джала, Б. Я. Вербенець, М. І. Мельник, Т. І. Шевчук // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2009. – **45**, № 3. – С. 106–111.
(*Dzhala R. M., Verbenets' B. Ya., Mel'nyk M. I., and Shevchuk T. I. Determination of parameters of corrosion protection of underground pipelines from noncontact measurements of current // Materials Science. – 2009. – **45**, № 3. – P. 441–447.*)
16. Джала Р. М. Основи обстеження і контролю корозійного стану підземних трубопроводів // Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довідн. пос. / Під заг. ред. В. В. Панасюка. Т. 11: Міцність і довговічність нафтогазових трубопроводів і резервуарів. – Львів: “Сполом”, 2009. – С. 143–184.
17. Джала Р. М., Вербенець Б. Я., Шевчук Т. І. Програма комп'ютерного опрацювання безконтактних вимірів струмів комунікацій // Вісник НУ “Львівська політехніка”. Автоматика, вимірювання та керування. – 2010. – № 665. – С. 160–164.

Одержано 05.04.2011