ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМ. Г. В. КАРПЕНКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису

МЕЛЬНИК МАР'ЯН ІГОРОВИЧ

УДК 681.518.3: 537.8: 620.1: 621.643.2

ДИСЕРТАЦІЯ

Розроблення методу і засобів контролю поляризаційного потенціалу підземних трубопроводів

05.11.13 - прилади і методи контролю та визначення складу речовин (шифр і назва спеціальності)

> 05 «Технічні науки» (галузь знань)

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Мия М. З. Мельши (підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Jeunico beix queeipeeuxis gucepraini Jacobiorius yauni ceapert MARTINA IE. MEXAP

Науковий керівник -

Джала Роман Михайлович доктор технічних наук

15. Pycecer/

Львів – 2017

АНОТАЦІЯ

Мельник М. І. Розроблення методу і засобів контролю поляризаційного потенціалу підземних трубопроводів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.11.13 "Прилади і методи контролю та визначення складу речовин" (152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка) – Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Львів, 2017.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної і практично важливої науковотехнічної задачі неруйнівного контролю стану комплексного захисту від корозії підземних металевих конструкцій.

Метою роботи є розвиток методів та створення технічних засобів контролю електричних потенціалів та ізоляційного покриття для діагностичних обстежень стану протикорозійного захисту підземних металевих трубопроводів. Для досліджень інформативних ознак електромагнітного поля ПТ та розробки контактного методу обстежень ПТ використано методи теорії електромагнітного поля, методи теорії кіл з розподіленими параметрами, методи розрахунку електричних полів в об'ємних провідниках. В роботі одержано нові наукові результати:

1. Розвинуто метод визначення поляризаційного потенціалу поверхні металу в електролітичному середовищі шляхом вимірювань постійних і змінних напруг та визначення коефіцієнта гармоніки для вилучення омічної складової і контролю електрохімічного захисту від корозії.

2. Вперше реалізовано в апаратурі ВПП метод визначення поляризаційного потенціалу за одночасними вимірами постійних і змінних електричних напруг, показано придатність створеної апаратури для контролю катодної поляризації та пошуку місць пошкодження ізоляції ПТ за відомими методами Пірсона і поперечного градієнта потенціалу.

3. Вперше на основі розв'язку крайової задачі електродинаміки встановлено залежності ефективної ємності металевого циліндра з ізоляцією в електропровідному середовищі від електрофізичних параметрів структури і частоти поля, що дає змогу обґрунтовано вибирати частоту поля для визначення омічного складника потенціалу.

4. Розвинуто метод визначення розподілу перехідного питомого опору ізоляційного покриву ПТ за комплексом вимірів струмів, потенціалів і координат для неруйнівного контролю протикорозійного захисту.

Практичне значення одержаних результатів полягає у створенні засобів вимірювань поляризаційного потенціалу для контролю ЕХЗ і розробленні методів контролю ізоляційних покривів ΠТ. ïχ застосування Визначення для поляризаційного потенціалу з вилученням омічної складової без відключень катодних установок і без використання компенсаторів спаду напруги в середовищі, чи стаціонарних електродів порівняння зменшує трудозатрати, підвищує вірогідність результатів контролю ЕХЗ. Створена апаратура ВПП з пам'яттю та інтерфейсом дозволяє оперативно отримувати кількісну інформацію про стан ПКЗ на різних ділянках та виявляти місця пошкоджень ізоляції ПТ за відомими методами Пірсона та градієнта.

Використання ВПП у комплексі з апаратурою безконтактних вимірювань струму БВС дає змогу у зоні дії установки катодного захисту, що подає на трубопровід випрямлений пульсуючий струм (що має постійного і змінного з частотою 100 Гц складники) визначати розподіл вздовж траси густину постійного складника струму катодного захисту та перехідного питомого опору ізоляції на різних ділянках ПТ. Застосування глобальної системи позиціонування (GPS) з визначенням віддалі між вимірами полегшує визначення параметрів ізоляції ПТ і документування результатів діагностичних обстежень. Нагромадження вимірів та передача їх у комп'ютер підвищує оперативність і зменшує імовірність помилок опрацювання і забезпечує документування результатів обстежень.

У дисертаційній роботі розв'язано актуальну і практично важливу науковотехнічну задачу – розвинуто метод визначення поляризаційного потенціалу і створено прилади для контролю електрохімічного захисту та ізоляційного покриття для діагностичних обстежень стану ПКЗ ПТ. За результатами роботи сформульовано наступні висновки.

На основі розв'язку крайової задачі електродинаміки встановлено залежності ефективної ємності металевого циліндра з ізоляцією в електропровідному середовищі від електрофізичних параметрів структури і частоти поля, що дає змогу обґрунтовано вибирати частоту поля для визначення омічного складника потенціалу. Показано, що для розрахунків ємності металевої конструкції з ізоляційним покривом у слабопровідному середовищі не слід застосовувати формули, які ґрунтуються на рівняннях електростатичного поля зарядженого тіла, а треба використовувати розв'язки електродинамічної задачі з урахуванням залежностей розподілу поля від частоти.

Розвинуто метод визначення поляризаційного потенціалу поверхні металу в електролітичному середовищі шляхом вимірювань постійних і змінних напруг та визначення коефіцієнта гармоніки для вилучення омічної складової і контролю електрохімічного захисту від корозії. На основі зіставлення реальних значень складових перехідного опору підземних трубопроводів встановлено, що застосування запропонованого методу визначення поляризаційного потенціалу правомірне при використанні частот змінної напруги в діапазоні 2...2000 Гц.

Створено апаратуру типу ВПП-М з модулем визначення координат та пам'яттю для контактних вимірювань постійних і змінних електричних напруг та визначення поляризаційного потенціалу з вилученням омічної складової без відключень катодних установок і без використання компенсаторів спаду напруги в середовищі, чи стаціонарних електродів порівняння. Апаратура ВПП-М дозволяє оперативно отримувати кількісну інформацію про стан ПКЗ на різних ділянках та виявляти місця пошкоджень ізоляції ПТ за відомими методами Пірсона та градієнта. Використання апаратури ВПП-М у комплексі з апаратурою БВС-К дає змогу визначати розподіл вздовж траси густини постійного складника струму катодного захисту та перехідного питомого опору ізоляційного покриву на різних ділянках ПТ. У випадку захисту постійним струмом його можна модулювати сигналом з вибраною частотою або застосовувати генератор змінного струму. Метрологічними дослідженнями підтверджено відповідність технічних характеристик ВПП-М нормативним вимогам до апаратури для обстежень підземних трубопроводів; встановлено, що основна відносна похибка вимірювань потенціалів по чотирьох каналах не перевищує 1,2%.

Створену апаратуру ВПП-М використано під час натурних випробувань та експериментальних обстежень протикорозійного захисту підземних трубопроводів, що підтверджено актами і спільними науковими публікаціями.

Ключові слова: трубопроводи підземні, комплексні обстеження, вимірювання електричних напруг, похибка, математична модель, електромагнітне поле, поляризаційний потенціал, ізоляція, протикорозійний захист.

ABSTRACT

Melnyk M. I. Development of methods and devices for testing of underground pipelines' polarization potential. – Qualifying scientific work on the manuscript.

Thesis for PhD of technical sciences by specialty 05.11.13 "Devices and methods of control and determination of substances composition" (152 – Metrology and measuring equipment) – H.V. KarpenkoPhysico-Mechanical Institute of National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, 2017.

The thesis is devoted to solution of the topical and practically important scientific and technical problem of non-destructive inspection of complex protection against corrosion of underground metal structures.

The goal of the work is development of methods and creation of technical means that inspect the electrical potentials and insulating covers for diagnostics of state of corrosion protection of the underground metal pipelines. The methods of electromagnetic field theory, theory of electrical circuits with distributed parameters as well as methods of calculation of electrical fields in bulk conductors have been used for investigation of informational signs of electromagnetic fields of UP and development of the contact method of UP's inspection. The new scientific results have been obtained in the work:

1. The method of determination of polarization potential of the metal surface in the electrolytic environment by measurement of direct and alternating voltages and harmonic factor determination for extraction of the ohmic component has been developed for control of the electrochemical protection against corrosion.

2. The method of polarization potential determination by simultaneous measurement of direct and alternating voltages is implemented in VPP-M equipment for the first time. It is shown the created equipment's capability for cathode polarization's inspection and tracing the UP's insulation damages by the known methods of Pearson and transverse potential's gradient

3. The dependence of effective capacitance of a metal cylinder with insulator in conductive environment on electrophysical parameters of field's structure and frequency has been determined for the first time on the base of electrodynamics boundary problem's solution. This allows reasonable choosing the field's frequency for determination of the ohmic component of potential.

4. For the non-destructive inspection of corrosion protection, it has been developed the method of determination of the transition specific resistance distribution for the UP's insulating cover by the complex of currents', potentials' and coordinates' measurement.

Practical importance of the obtained results consists in creation of means that measure polarization potential for inspection of ECP as well as in development of methods for application these means in inspection of UP's insulating covers. Determination of polarization potential with elimination of the ohmic component that does not need deactivation of cathodic protection unit and using a compensator of voltage drop in an environment or stationary reference electrodes decreases effort and increases reliability of ECP inspection results. Created VPP equipment together with the memory and the interface allows on-line obtaining a quantitative information about corrosion protection in different sections of UP and to detect the damaged insulation by the known methods of Pearson and gradient.

Combined utilization of VPP equipment together with BVS equipment makes it possible to determine the along-the-line distribution of both DC density of CP and the insulating cover's transition specific resistance in different sections of the UP within active zone of CP unit that supply the rectified pulsed current (containing direct and 100Hz alternate components) on a pipeline. Application of the Global Positioning System (GPS) with determination of the distance between measurements makes easier determination of UP's insulation parameters as well as documentation of the inspection results. Accumulation of measurements and their transfer into computer increases efficiency, decreases probability of the processing errors and provides documentation of the inspection of the inspection results.

It has been solved in the thesis the topical and practically important scientific and technical problem: developed method of polarization potential determination and created instruments for the inspection of the electrochemical protection and insulating covers providing diagnostics of UP's corrosion protection state. As the work's results, the next conclusion has been formulated.

On the basis of the solution of the electrodynamics boundary problem, it is determined the dependences of effective capacitance of an insulated metal cylinder in electro-conductive medium on the electrophysical parameters of field'sstructure and frequency. It allows reasonable choosing the field's frequency for determination of the ohmic component of potential. It is shown that the solutions of the electrodynamics' problem with taking into account the dependence of the field distribution frequency should be used for calculation of the capacitance of the metal construction with insulating cover in weaklyconductive environment instead of formulae based on the equations for electrostatic field of a charged body.

The method of determining the polarization potential of the metal surface in the electrolytic environment by measurement of direct and alternatingvoltages and harmonic factor determination for extraction of the ohmic component has been developed for control of the electrochemical protection against corrosion. It is found by comparison of the actual values of the transition resistance components for the underground pipelines (UP) that application of the proposed method of polarization potential determination is rightful for AC voltage frequency in range of 2 ... 2000 Hz.

It is created the VPP-M equipment with the coordinates determining module and the memory for contact measurements of direct and alternate electrical voltages which determines the polarization potential with the eliminated ohmic component and does not need deactivation of cathodic protection (CP) unit and using a compensator of voltage drop in an environment or stationary reference electrodes. The equipment VPP-M allows quickly to obtain a quantitative information about corrosion protection in different sections of UP and to detect the damaged insulation of UP by the known methods of Pearson and gradient. Combined utilization of VPP-M equipment together with BVS-K equipment makes it possible to determine the along-the-line distribution of both DC density of CP and the insulating cover's transition specific resistance in different sections of the UP. In case of DC protection it can be modulated by the signalwith selected frequency or the AC generator can be applied.

Metrological studies confirmed compliance the technical specifications of VPP-M equipment with standard requirements for UP inspection's equipment. It is found that the main relative error of potential measurements within four channels does not exceed 1.2%.

CreatedVPP-M equipment was used in the field tests and experimental inspection on routes of underground pipelines. It was confirmed by the corresponding acts and the joint scientific publications.

Keywords: underground pipelines, combined inspection, measuring of electrical voltage, polarizing potential, error, mathematical model, electromagnetic field, insulation, corrosion protection.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. DzhalaR.M. Measuring of Electric Potentials for the Diagnostics of Corrosion Protection of the Metal Structures / R.M. Dzhala, B.Ya.Verbenets', M.I. Melnyk // Materials Science. – 2016. – Vol. 52, № 1. – P. 140–145.

 Нові методи контролю корозії підземних трубопроводів за вимірами струмів і потенціалів / Р. Джала, Б. Вербенець, М. Мельник, А. Мицик, Р. Савула, О. Семенюк // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2016. – Т. 52, № 5.– С. 115–123.

3. Джала Р.М. Вплив електрофізичних параметрів середовища на ємність металевого циліндра з ізоляцією / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, М.І. Мельник // Відбір і обробка інформації. – 2016. – 44(120). – С. 12–16.

4. Джала Р.М. Визначення поляризаційного потенціалу металу в електропровідному середовищі / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, М.І. Мельник // Відбір і обробка інформації. – 2013. – 38 (114). – С. 82–85.

5. Джала Р.М. Вимірювання поляризаційного потенціалу з вилученням омічного складника / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, М.І. Мельник // Вісник Східноукраїнського національного університету. – 2013. – 14 (203). – С. 147–151.

6. Визначення параметрів подвійного електричного шару для моделювання корозії на межі метал-електроліт / Р.М. Джала, В.М. Юзевич, М.І. Мельник, О.П. Чабан // Комп'ютерні науки та інформаційні технології. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – Львів : Вид. НУ "Львівська політехніка", 2011. – № 694. – С. 370–376.

7. Патент на корисну модель UA 102424. МПК G01R19/25, G01N17/02, C23F13/04 "Пристрій для вимірювань постійних і змінних електричних напруг та поляризаційного потенціалу" / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, М.І. Мельник / ФМІ НАН України. – Заявка и 201504831 подано 18.05.2015. – Опубліковано 26.10.2015, Бюл. № 20.

8. Свідоцтво про реєстрацію авторського права твір № 65449. на Комп'ютерна програма "Програма опрацювання вимірів постійних і змінних електричних напруг та поляризаційного потенціалу" / Б.Я. Вербенець, Р.М. Джала, М.І. Мельник – Державна служба інтелектуальної власності України. – Ресстр. 18.05.2016.

9. Метод контролю перехідного опору захисного покриву ділянки підземного трубопроводу / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, О.Й. Винник, В.Р. Джала, М.І. Мельник, Р.Ф. Савула // Фіз.-хім. механіка матеріалів: спецвипуск № 9. Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів. Т.2, 2012. – С. 668–672.

10. Джала Р.М. Методи визначення потенціалу поляризації металу в електропровідному середовищі / Р.М. Джала, М.І. Мельник // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів (серія), вип. 14: зб.наук.праць. – Львів: ФМІ НАНУ, 2009. – С. 125–128.

11. Determination of parameters of corrosion protection of underground pipelines
from non contact measurements of current / R.M. Dzhala, B.Ya.Verbenets',
M.I. Melnyk, T.I. Shevchuk // MaterialsScience. – 2009. – Vol. 45, № 3. – P. 441–146.

12. Технологія обстежень підземних трубопроводів з використанням безконтактних вимірювань струмів / Р.М. Джала, С.Ф. Савула, Б.Я. Вербенець, О.Й. Винник, В.Р. Джала, М.І. Мельник, Т.І. Шевчук // Методи та прилади контролю якості. – 2009. – № 22. – С. 22–27.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

13. Мельник М. І. Контроль протикорозійного захисту підземного трубо проводу з використанням апаратури ВПП. // Матеріали XXIV відкритої науковотехнічної конференції молодих науковців і спеціалістів Фізико-меха-нічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України, Львів. – 2015. – С. 256–258

14. Апаратура МГП для обстежень підземних трубопроводів / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, А.Б. Мицик, М.І. Мельник // 7-а Міжнародна науково-технічна конференнція і виставка "Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання": зб. матеріалів доп. – Івано-Франківськ : НТУНГ, 2014. – С. 317–321.

15. Мельник М. І. Розробка засобів контролю електрохімічного захисту підземних металевих споруд. // Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання: Матеріали IV науково-практичної конференції студентів і молодих учених, Івано-Франківськ. – 2013. – С. 119–120.

16. Мельник М. І. Пристрій для вимірювання поляризаційного потенціалу // Відкрита науково-технічна конференція молодих науковців і спеціалістів Фізикомеханічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України: Матеріали XXIII конференції КМН-2013. Львів. – 2013. – С. 320–323.

17. Методи і засоби діагностичних обстежень підземних трубопроводів / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, М.І. Мельник, Т.І. Шевчук. / Методи та засоби діагностики і контролю технічного стану трубопровідних систем різного діаметру : тези наук.-техн. семінару. – Київ, 2013 – С. 57–65.

18. Автоматизація пристрою для вимірювання поляризаційного потенціалу / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, С.С. Думич, М.І. Мельник // Комп'ютерне моделювання та програмне забезпечення інформаційних систем і технологій: Тези доповідей ІІ Всеукраїнської науково-практичної конференції. – Львів, 2013 – С. 97.

19. Джала Р.М. Нові методи і засоби контролю ПКЗ підземних трубопроводів за вимірами струмів і потенціалів / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, М.І. Мельник // Збірник доповідей 8-ї Національної науково-технічної конференції "Неруйнівний контроль та технічна діагностика" / Київ : УТ НКТД, 2016. – С. 236–239.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

20. Контроль протикорозійного захисту магістральних трубопроводів за безконтактними вимірами струму в умовах завад / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, М.І. Мельник, Р.Ф. Савула, О.М. Семенюк// Фіз.-хім. механіка матеріалів: спецвипуск № 10. Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів. Т.2, 2014. – С. 539–544.

21. Джала Р.М. Моделювання адсорбційних зв'язків та їх впливу на інформативні параметри межі метал-електроліт / Р.М. Джала, В.М. Юзевич, М.І. Мельник // Комп'ютерні науки та інформаційні технології (КНІТ). – Львів : Вид. НУ "Львівська політехніка", – 2015. – № 826. – С. 185–190

22. Електрохімічний захист підземного трубопроводу в зоні впливу ліній електропередач / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, О.Й. Винник, Ю.М. Гужов, С.Ф. Савула, М.І. Мельник // Фіз.-хім. механіка матеріалів: спецвипуск №8: Проблеми корозії та протикорозійного захисту металів, Т.2, 2010. – С. 498–503.

23. Методологія і апаратура оперативних комплексних обстежень підземних трубопроводів / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, Я.Є. Підгірняк, М.І. Мельник, О.О. Червінка, // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин. – К. : ІЕЗ ім. Є.О.Патона НАНУ, 2012. – С. 66–71.

24. Патент на корисну модель UA 95140 U. МПК G 01R 29/12. "Пристрій для вимірювання електричного поля в електроліті" / Р.М. Джала, Я. Є. Підгірняк, М. І. Мельник, О. М. Семенюк / ФМІ НАН України: – Заявка и 2014 07390 – Подано 01.07.2014. – Опубл.10.12.2014, Бюл. № 23.

3MICT

АНОТАЦІЯ	2
ЗМІСТ	12
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	15
ВСТУП	16
РОЗДІЛ І ОГЛЯД І АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ СТАНУ	
ПРОТИКОРОЗІЙНОГО ЗАХИСТУ ПІДЗЕМНИХ ТРУБОПРОВОДІВ	23
1.1 Фактори корозії підземних металевих конструкцій	23
1.1.1 Загальна характеристика ПМК	24
1.1.2 Корозійна активність ґрунту	25
1.1.3 Методи і засоби захисту від корозії ПМК	27
1.2 Контроль ізоляційних покривів	29
1.3 Контроль електрохімічного захисту	33
1.3.1 Поляризаційний потенціал як основний показник ефективності ЕХЗ	33
1.3.2 Огляд і аналіз методів вилучення омічного складника	34
1.3.3 Огляд і аналіз засобів для вимірювання різниці потенціалів	38
1.4 Визначення поляризаційного потенціалу ПМК за вимірами постійних	
і змінних електричних напруг	42
Висновки по розділу 1	45
РОЗДІЛ 2 РОЗВИТОК ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО МЕТОДУ КОНТРОЛЮ	
ПРОТИКОРОЗІЙНОГО ЗАХИСТУ ПІДЗЕМНИХ ТРУБОПРОВОДІВ	46
2.1 Феноменологічні схеми межі металу трубопроводу з ізоляційним	
покриттям в електропровідному середовищі	46
2.2 Рівняння і складові електромагнітного поля трубопроводу	52
2.3 Вплив електрофізичних параметрів середовища на ємність металевого	
циліндра з ізоляцією	67
2.4 Електрофізичні параметри міжфазного шару	72
2.5 Обгрунтування методу ВПП	82

2.5.1 Визначення діапазону частот, в якому правомірне застосування		
методу ВПП	84	
2.5.2 Експериментальна перевірка методу ВПП		
Висновки до розділу 2		
РОЗДІЛ З РОЗРОБЛЕННЯ ПРИЛАДУ ДЛЯ ВИМІРЮВАНЬ ПОСТІЙНИХ І		
ЗМІННИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ НАПРУГ ТА ПОЛЯРИЗАЦІЙНОГО		
ПОТЕНЦІАЛУ	89	
3.1 Вимоги до апаратури ВПП	89	
3.2 Макет апаратури для вимірювань потенціалів і змінних електричних		
напруг	90	
3.2.1 Принципові схеми аналогової частини вимірювача електричних		
напруг	92	
3.2.2 Макетування вузлів чотириканального пристрою ВПП	94	
3.2.3 Розроблення програми мікропроцесора пристрою ВПП	94	
3.3 Апаратура для вимірювань електричних напруг і поляризаційного		
потенціалу ВПП	97	
потенціалу ВПП	97	
потенціалу ВПП	97 100	
потенціалу ВПП	97 100 101	
потенціалу ВПП	97 100 101 103	
потенціалу ВПП 3.4 Вдосконалення апаратури для вимірювання постійних і змінних електричних напруг та поляризаційного потенціалу 3.4.1 Розробка схем апаратури ВПП-М 3.4.2 Розробка конструкції та виготовлення апаратури ВПП-М 3.4.3 Елементи управління та алгоритм роботи апаратури ВПП-М	97100101103107	
 потенціалу ВПП	97 100 101 103 107	
 потенціалу ВПП	97100101103107114	
 потенціалу ВПП. 3.4 Вдосконалення апаратури для вимірювання постійних і змінних електричних напруг та поляризаційного потенціалу	 97 100 101 103 107 114 118 	
 потенціалу ВПП. 3.4 Вдосконалення апаратури для вимірювання постійних і змінних електричних напруг та поляризаційного потенціалу. 3.4.1 Розробка схем апаратури ВПП-М. 3.4.2 Розробка конструкції та виготовлення апаратури ВПП-М. 3.4.3 Елементи управління та алгоритм роботи апаратури ВПП-М. 3.5 Застосування системи глобального позиціонування в обстеженнях підземних трубопроводів. Висновки по розділу 3. РОЗДІЛ 4 МЕТРОЛОГІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ І РОЗРОБЛЕНОЇ 	 97 100 101 103 107 114 118 	
 потенціалу ВПП. 3.4 Вдосконалення апаратури для вимірювання постійних і змінних електричних напруг та поляризаційного потенціалу	 97 100 101 103 107 114 118 119 	
 потенціалу ВПП	 97 100 101 103 107 114 118 119 	
 потенціалу ВПП	 97 100 101 103 107 114 118 119 119 	
 потенціалу ВПП. 3.4 Вдосконалення апаратури для вимірювання постійних і змінних електричних напруг та поляризаційного потенціалу	 97 100 101 103 107 114 118 119 119 	

4.5 Лаобраторні випробування зразка апаратури Біпт-ні та коректування	
схем	128
4.4 Метрологічні дослідження виготовленої апаратури ВПП-М	129
4.4.1 Перевірка технічних характеристик приладу ВПП-М	130
4.4.2 Визначення інструментальних похибок приладу ВПП-М	133
4.4.3 Визначення методичних похибок	135
Висновки по розділу 4	140
РОЗДІЛ 5 НАТУРНІ ВИПРОБУВАННЯ АПАРАТУРИ ВПП-М	141
5.1 Підготовка до роботи та визначення поляризаційного потенціалу в	
натурних умовах	141
5.2 Пошук місць пошкоджень захисного покриття методом Пірсона та	
поперечного градієнта	143
5.3 Комплексні обстеження ПТ апаратурою БВС-К та ВПП-М	146
5.3.1 Опрацювання вимірів струмів та потенціалів. Виявлення місць	
корозії	148
5.3.2 Документування результатів контролю ПКЗ ПІ	157
5.3.2 Документування результатів контролю ПКЗ ПТ 5.4 Програмне забезпечення приладу ВПП-М	157 158
5.3.2 Документування результатів контролю ПКЗ ПТ 5.4 Програмне забезпечення приладу ВПП-М Висновки по розділу 5	157 158 162
 5.3.2 Документування результатів контролю ПКЗ ПТ 5.4 Програмне забезпечення приладу ВПП-М Висновки по розділу 5 ВИСНОВКИ 	157 158 162 163
 5.3.2 Документування результатів контролю ПКЗ ПТ 5.4 Програмне забезпечення приладу ВПП-М Висновки по розділу 5 ВИСНОВКИ СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 	157 158 162 163 165
 5.3.2 Документування результатів контролю ПКЗ ПТ 5.4 Програмне забезпечення приладу ВПП-М Висновки по розділу 5 ВИСНОВКИ СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ДОДАТКИ 	 157 158 162 163 165 189
 5.3.2 Документування результатів контролю ПКЗ ПТ 5.4 Програмне забезпечення приладу ВПП-М Висновки по розділу 5 ВИСНОВКИ СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ДОДАТКИ А Керівництво до експлуатації ВПП-М 	 157 158 162 163 165 189 189
 5.3.2 Документування результатів контролю ПКЗ ПГ	 157 158 162 163 165 189 189 206
 5.3.2 Документування результатів контролю ПКЗ ПП 5.4 Програмне забезпечення приладу ВПП-М	157 158 162 163 165 189 189 206 211
 5.3.2 Документування результатів контролю ПКЗ ПП 5.4 Програмне забезпечення приладу ВПП-М. Висновки по розділу 5. ВИСНОВКИ. СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ. ДОДАТКИ. А Керівництво до експлуатації ВПП-М. Б Керівництво користувача комп'ютерної програми "Reader VPP". В Програма і протокол метрологічних досліджень ВПП-М. Г Текст прошивки мікроконтролера РІС (фрагмент). 	157 158 162 163 165 189 189 206 211 235
 5.3.2 Документування результатів контролю ПКЗ ПТ	 157 158 162 163 165 189 189 206 211 235 236
 5.3.2 Документування результатів контролю ПКЗ ПГ	 157 158 162 163 165 189 189 206 211 235 236 241

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АЦП	– аналогово-цифровий перетворювач		
БВС-К	– безконтактний вимірювач струму з модулем позиціонування		
ВПП	– вимірювач поляризаційного потенціалу		
ВПП-М	– вимірювач поляризаційного потенціалу з модулем позиціонуванн		
ДЕ	– допоміжний електрод		
ЕП	– електрод порівняння		
EX3	– електрохімічний захист		
MCE	– мідносульфатний електрод порівняння		
МХПЕП	– модифікований хімічний потенціал електронів провідності		
ОК	– об'єкт контролю		
ПЕШ	– подвійний електричний шар		
ПК	– персональний комп'ютер		
ПКЗ	 протикорозійний захист 		
ПМК	– підземні металеві конструкції		
ПП	 – поляризаційний потенціал 		
ПТ	– підземний трубопровід		
TEM	– поперечна електромагнітна хвиля		
УКЗ	– установка катодного захисту		

ВСТУП

Трубопроводи використовують для транспортування газу, нафти, води, продуктів хімічної промисловості. Впливи агресивного середовища призводять до руйнування трубопроводів тому для їх надійного функціонування необхідні належний протикорозійний захист (ПКЗ) і його періодичний контроль [1-5]. Підземні трубопроводи (ПТ) і пов'язані з ними металеві конструкції захищають від корозії ізоляційними покривами і катодною поляризацією [2-11].

Основним критерієм захисту вважають поляризаційний потенціал (ПП), який для сталі повинен знаходитись у межах від -0.85 до -1.15 V відносно мідносульфатного електрода порівняння (ЕП) [5-11]. Помірне його перевищення зазвичай не шкодить захисній конструкції. Негативними тут є втрати електроенергії і допоміжних анодів. Проте за значного перевищення на захисній поверхні виділяється водень, який зумовлює відшарування органічних захисних покривів та водневе окрихчення і розтріскування сталі [12]. Тому за катодної поляризації металоконструкцій в електропровідному середовищі потенціал треба контролювати і підтримувати у певних діапазонах, які забезпечують необхідний захист металу від корозії.

Значний вклад у розвиток методів і засобів ПКЗ, обстежень і контролю ПТ зробили вчені Великобританії, Німеччини, Франції, США, Росії [1-4, 6, 13-17]; в Україні відомі школи: київська, львівська, харківська, івано-франківська та інші [5, 8-12, 18-40]; внесок у постановку і розв'язання проблеми діагностичних обстежень ПТ зробили Р. Джала, Л. Дикмарова, Л. Мізюк, Б. Вербенець та інші науковці ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України [9, 11, 22-26, 41-52].

Діагностичні обстеження і контроль ПКЗ ПТ традиційно проводять електрометричними контактними методами з поверхні землі [7-9]. Внутрішньотрубна дефектоскопія виявляє вже наявні пошкодження металу труби, але не дає потрібної інформації про стан захисту для запобігання корозії [51]. Розроблені методи і прилади безконтактних вимірювань струмів (БВС) суттєво підвищують оперативність та ефективність обстежень ізоляції ПТ [9, 11, 34, 35, 38-57], проте не дають потрібної інформації про потенціали.

Різниця потенціалів між металом підзахисної конструкції і ЕП, виміряна високоомним вольтметром, містить, крім поляризаційного складника, ще й омічний спад напруги *IR* внаслідок проходження струму *I* через ефективний опір *R* між ЕП і металом. Але тільки поляризація поверхні обумовлює ефект катодного захисту, тому для контролю ПП з виміряної різниці потенціалів треба вилучати омічного складника.

Тому **актуальність** дисертаційної роботи викликана необхідністю досліджень та розробки методу і апаратури вимірювань ПП металу в електропровідному середовищі та їх застосування у комплексі з БВС для підвищення оперативності та інформативності діагностичних обстежені ПКЗ ПТ, визначення параметрів активного і пасивного захисту та виявлення місць корозії для запобігання пошкоджень і продовження термінів експлуатації магістральних нафто-, ґазо-, водо-, продуктопроводів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана в руслі наукових досліджень відділу електрофізичних методів неруйнівного контролю ФМІ НАН України, які проводились дисертантом як виконавець за період 2009-2016 рр. під час держбюджетних та госпдоговірних науково-дослідних робіт. У тому числі держбюджетні теми за постановами України: "Дослідження методів відбору і опрацювання Президії HAH електромагнітних сигналів для діагностування корозійного стану підземних трубопроводів", № ДР 0110U000434; "Дослідження і розробка електромагнітних методів, засобів відбору й опрацювання інформації для контролю протикорозійного захисту магістральних трубопроводів", № ДР 0111U002384; "Розроблення технології захисту від корозії та корозійно-механічного руйнування металоконструкцій y сірководневих середовищах", № ДР 0112U002777; "Дослідження інформативних ознак електромагнітного поля біля поверхні металу провідному покриттям V середовищі для діагностування корозії 3

металоконструкцій", № ДР 0114U004000; науково-технічний проект «Розроблення та виготовлення апаратури МГП для діагностичних обстежень та контролю протикорозійного захисту підземних трубопроводів», № ДР 0113U000926; "Розробка методології і апаратури оперативних комплексних обстежень підземних трубопроводів", № ДР 0110U004555 та "Розроблення системи і підготовка апаратурного забезпечення діагностичних обстежень підземних трубопроводів" № ДР 0115U004004 комплексної програми досліджень НАН України «Ресурс».

До дисертації залученні також результати досліджень і розробок, проведених у рамках НДР ФМІ за договорами №№ 769, 1057, 1370, 1525 – виконавець.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є розвиток методів та створення технічних засобів контролю електричних потенціалів та ізоляційного покриття для діагностичних обстежень стану ПКЗ підземних металевих трубопроводів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі наукові задачі:

• проаналізувати сучасний стан методів і засобів контролю протикорозійного захисту підземних трубопроводів (ПКЗ ПТ);

• розвинути і обґрунтувати метод визначення поляризаційного потенціалу;

 дослідити вплив електрофізичних параметрів середовища на електричну ємність металевого циліндра з ізоляцією;

 розробити апаратуру для вимірювального контролю поляризаційного потенціалу та стану захисного покриття ПТ;

• розвинути комплексний метод контролю ПКЗ ПТ за вимірами струму, потенціалів і координат;

• розробити програмне забезпечення апаратури для опрацювання результатів вимірювань;

 провести метрологічні дослідження та натурні випробування розробленої апаратури;

Об'єкт дослідження – контроль захисту від корозії підземного трубопроводу.

Предмет дослідження – контактний метод вимірювань постійних і змінних електричних напруг і поляризаційного потенціалу та прилади для діагностичних обстежень підземних трубопроводів.

Методи досліджень. Для досліджень інформативних ознак електромагнітного поля ПТ та розробки контактного методу обстежень ПТ використано методи теорії електромагнітного поля, методи теорії кіл з розподіленими параметрами, методи розрахунку електричних полів в об'ємних провідниках. Дослідження та розробки апаратурного і методичного забезпечення проведені на основі математичного моделювання з використанням емпіричних і евристичних підходів, лабораторних і натурних випробувань. Експериментальні дослідження характеристик засобів обстежень виконані методами електричних і електромагнітних (індукційних) вимірювань. Перевірки результатів роботи створеної апаратури проводились шляхом їх зіставлень з результатами традиційної контактної електрометрії на випробувальних стендах та при комплексних корозійних обстеженнях ПТ у процесі експлуатації.

Наукова новизна результатів, одержаних у дисертаційній роботі, полягає у розвитку методу контактних вимірювань електричних напруг і поляризаційного потенціалу та створенні засобів для контролю стану ПКЗ ПТ в умовах експлуатації.

1. Розвинуто метод визначення поляризаційного потенціалу поверхні металу в електролітичному середовищі шляхом вимірювань постійних і змінних напруг та визначення коефіцієнта гармоніки для вилучення омічної складової і контролю електрохімічного захисту від корозії.

2. Вперше реалізовано в апаратурі ВПП метод визначення поляризаційного потенціалу за одночасними вимірами постійних і змінних електричних напруг, показано придатність створеної апаратури для контролю катодної поляризації та пошуку місць пошкодження ізоляції ПТ за відомими методами Пірсона і поперечного градієнта потенціалу.

3. Вперше на основі розв'язку крайової задачі електродинаміки встановлено залежності ефективної ємності металевого циліндра з ізоляцією в електропровідному середовищі від електрофізичних параметрів структури і частоти поля, що дає змогу обґрунтовано вибирати частоту поля для визначення омічного складника потенціалу.

4. Розвинуто метод визначення розподілу перехідного питомого опору ізоляційного покриву ПТ за комплексом вимірів струмів, потенціалів і координат для неруйнівного контролю протикорозійного захисту.

Практичне значення одержаних результатів полягає у створенні засобів вимірювань поляризаційного потенціалу для контролю ЕХЗ і розробленні методів їх застосування для контролю ізоляційних покривів ПТ.

1. Визначення поляризаційного потенціалу з вилученням омічної складової без відключень катодних установок і без використання компенсаторів спаду напруги в середовищі, чи стаціонарних електродів порівняння зменшує трудозатрати, підвищує вірогідність результатів контролю ЕХЗ.

2. Створена апаратура ВПП з пам'яттю та інтерфейсом дозволяє оперативно отримувати кількісну інформацію про стан ПКЗ на різних ділянках та виявляти місця пошкоджень ізоляції ПТ за відомими методами Пірсона та градієнта.

3. Використання ВПП у комплексі з апаратурою безконтактних вимірювань струму БВС дає змогу у зоні дії установки катодного захисту, що подає на трубопровід випрямлений пульсуючий струм (що має постійного і змінного з частотою 100 Гц складники) визначати розподіл вздовж траси густину постійного складника струму катодного захисту та перехідного питомого опору ізоляції на різних ділянках ПТ. У випадку захисту постійним струмом можна модулювати його сигналом з вибраною частотою або застосовувати генератор змінного струму.

4. Застосування глобальної системи позиціонування (GPS) з визначенням віддалі між вимірами полегшує визначення параметрів ізоляції ПТ і документування результатів діагностичних обстежень. 5. Накопиченння вимірів та передача їх у комп'ютер підвищує оперативність і зменшує імовірність помилок опрацювання і документування результатів обстежень. Розроблена інформаційна технологія з засобами технічного забезпечення у систему ПКЗ підвищує інформативність обстежень, дає можливість переходити від регламентного контролю до контролю та ремонту за технічним станом для запобігання пошкоджень, підвищення надійності і продовження термінів експлуатації дорогих і важливих підземних трубопроводів і металевих споруд.

Особистий внесок здобувача. Викладені у дисертації основні наукові результати отримані автором самостійно. У працях, опублікованих у співавторстві здобувачеві належать: аналіз методів і засобів контролю; розвиток і обґрунтування методу; участь у розв'язанні й узагальненні результатів; участь у розробках функціональних схем і виготовленні апаратури; алгоритми опрацювання вимірів; участь у відладці програмного забезпечення; участь у натурних випробуваннях, метрологічних дослідженнях; участь в обстеженнях і контролі ПКЗ ПТ.

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень, включених до дисертаційної роботи, доповідались на 31 (з них 14 міжнародних) наукових конференціях і семінарах, у тому числі на: Міжнародних конференціях-виставках "Проблеми корозії та протикорозійного захисту конструкційних матеріалів "КОРОЗІЯ" (Львів, 2010, -12, -14, -16); Науково-технічних конференціях "Фізичні методи і засоби контролю матеріалів та виробів" ЛЕОТЕСТ (Славське, 2009-2012); Національних науково-технічних конференціх "Неруйнівний контроль та -16); Науково-технічних технічна діагностика – UkrNDT" (Київ, 2012, конференціях "Обчислювальні методи і системи перетворення інформації" (Львів, 2012, -16); 7-й Міжнародній науково-технічній конференції і виставці "Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання" (Івано-Франківськ, 2014); Відкритих науково-технічних конференціях молодих науковців і спеціалістів Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України" (Львів, 2011, -13, -15); Міжнародних науково-технічних конференціях

"Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах" (Одеса, 2014, -15); ІІ Всеукраїнській науково-практичній конференції "Комп'ютерне моделювання та програмне забезпечення інформаційних систем і технологій" (Львів, 2013).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 24 друковані праці, з них 13 статей у фахових наукових виданнях, затверджених МОН України, з них 3 входять до міжнародних наукометричних баз, 2 патенти, 1 свідоцтво про реєстрацію авторського права на комп'ютерну програму, а також тези доповідей – у наукових збірниках за матеріалами конференцій.

Структура та обсяг. Дисертація містить вступ, 5 розділів, висновки, список використаних джерел і додатки. Загальний обсяг дисертації становить 250 сторінок, у тому числі 149 сторінок тексту основної частини, 102 рисунки та 19 таблиць, перелік використаних джерел з 173 бібліографічних найменувань на 24 сторінках, додаток на 60 сторінках.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД І АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ СТАНУ ПРОТИКОРОЗІЙНОГО ЗАХИСТУ ПІДЗЕМНИХ ТРУБОПРОВОДІВ

1.1 Фактори корозії підземних металевих конструкцій

Корозія – це процес руйнування металу внаслідок фізико-хімічних взаємодій металевого матеріалу з середовищем [1-6]. Першопричина корозії – термодинамічна нестабільність системи "метал – середовище", створена вилученням металу зі стійких природних сполук [2-5, 9]. Під час зберігання, спорудження й експлуатації, при контакті металу з оточуючим середовищем самовільно протікають зворотні процеси його окислення з утворенням солей, окислів, гідроксидів.

За умовами протікання розрізняють низку видів корозії, найхарактернішими для підземних трубопроводів (ПТ) ϵ : ґрунтова корозія; корозія блукаючими струмами, біокорозія, стрес – корозія [2-4, 11, 52]. Встановлено, що внаслідок нерівномірного характеру корозійного руйнування, вже після 8-10 років експлуатації у стінках трубопроводу товщиною 8 мм появляються перші проржавіння, тобто швидкість локального руйнування становить 1 мм/рік [2-5]. Тому, на окремих ділянках ПТ, де швидкість руйнування може у 20 разів перевищувати середню, доводиться вже через вісім років замінювати труби (або заварювати каверни). Швидкість корозії в анодних зонах трубопроводу може досягати 2÷4 мм/рік. Відмічено випадки утворення наскрізної каверни протягом першого року експлуатації [3-6, 51].

Умови залягання підземних металевих конструкцій (ПМК) можуть змінюватись у часі з ряду причин [2-6, 8-11]. Тому для запобігання корозії й забезпечення їх надійної експлуатації необхідно вчасно й у відповідних місцях налагоджувати протикорозійний захист (ПКЗ), що вимагає проведення діагностичних обстежень стану ПМК. Пошкодження трубопроводів призводять до аварій і катастроф з втратами і перервами постачання транспортованих продуктів та значними екологічними наслідками. Обстеження дають можливість виявляти дефекти та спричинені впливом агресивного середовища корозійні пошкодження, контролювати і вчасно налагоджувати захист від корозії для запобігання пошкоджень і продовження безаварійної експлуатації трубопроводів і пов'язаних з ними металевих споруд. Надійність об'єктів нафтогазового комплексу значною мірою залежить від ефективності ПКЗ [3-8, 40, 11].

1.1.1 Загальна характеристика ПМК

Трубопроводи – ефективний вид транспорту для безперервної передачі на відстань газів, рідин, сипучих матеріалів. Залежно від призначення і територіального розташування розрізняють магістральні, житлово-комунальні і промислові (технологічні) трубопроводи. Трубопровідний транспорт займає перше місце за вантажообігом (біля 45 %) в Україні, на території якої діють понад 38000 км магістральних газопроводів, 4700 км магістральних нафтопроводів, 570 км магістрального аміакопроводу, 320000 км газорозподільних мереж [11, 40, 52].

Магістральні газо-, нафто-, продуктопроводи, в основному, прокладають підземно. Наземна їх прокладка (у насипі) або надземна (на опорах) можлива як виняток за відповідних умов [10].

Основними загальними параметрами трубопроводу є: умовний діаметр проходу, умовний тиск, і робоча температура [2-6]. Для магістральних трубопроводів використовують різні марки трубної сталі, питомий електричний опір яких знаходиться у межах $c_T = 0,18...0,29$ мкОм·м. Середній температурний коефіцієнт опору для трубних сталей дорівнює 0,003 1/°С. Відносна магнетна проникність сталі $\mu = 120 \div 300$; у розрахунках приймають рівною 200 [9, 11, 51, 52].

Товщина ізоляційних покриттів підземних трубопроводів d_i становить: бітумних 3 ÷ 9 мм; полімерних 0,6 ÷ 3 мм; епоксидних 0,3 ÷ 0,5 мм. Початковий перехідний електричний опір покриттів R_i кОм·м²: бітумних 3; полімерних 5 ÷ 10; епоксидних 50 ÷ 100. Опір ізоляції ПТ R_i^T Ом·км чи опір ізоляційного покриву R_i Ом·м² залежить від типу ізоляційного покриву і його стану [1-10]. Відносна діелектрична проникність ізоляційного матеріалу задається технічною документацією, або приймають $\varepsilon = 3, 4$.

Резервуари – стаціонарні та пересувні споруди різної форми та розмірів, які виконують важливі функції на складах нафти і нафтопродуктів, нафтопереробних заводах, головних і проміжних насосних станціях магістральних трубопроводів [11, 37]. Найбільш розповсюдженими є сталеві вертикальні резервуари.

Інші ПМК – металеві елементи різноманітних конструкцій, споруд, які розміщені під землею (контактують з ґрунтом).

1.1.2 Корозійна активність ґрунту

Корозійну агресивність грунту обумовлює волога, в якій розчинені різні солі, кислоти, луги, гази [2, 3, 8, 52]. Основними факторами, що визначають інтенсивність грунтової корозії є вологість ґрунту, його структура і гранулометричний склад, мінералізація, концентрація водневих іонів, окисно-відновний потенціал, повітропроникність, електропровідність, біогенність. Складні взаємозв'язки цих факторів призводять до того, що той чи інший параметр середовища за різних співвідношень може проявлятись не тільки з різною інтенсивністю, але і змінювати характер дії.

Для досліджень захисту від корозії ПТ важливими є електромагнетні характеристики ґрунтів. Питомий електричний опір ґрунтів знаходиться в межах від 0,3 до 5000 Ом·м, корозійну активність близько половини ґрунтів характеризують як середня з $\sigma_g = 20 \div 50$ Ом·м. Відносна діелектрична проникність ε ґрунту коливається в межах від одиниць (для сухого) до десяти (для вологого) [2, 9, 52], для води ε =80. Відносна магнетна проникність більшості ґрунтів близька до одиниці; лише за

значного вмісту феромагнетних мінералів вона збільшується до 11. Характеристики ґрунтів неоднакові по глибині, вздовж трубопроводів і змінюються з часом. Неоднорідності спричинюють відмінності електродних потенціалів на різних ділянках, що призводить до виникнення гальванічних елементів – корозійних пар з вирівнювальними струмами, що є причиною особливо небезпечних локальних видів корозії [1-6].

Корозійну активність ґрунту до сталі за ДСТУ 4219-2003 оцінюють за його питомим електричним опором, втратою маси зразків, густиною поляризувального струму. Корозійну активність встановлюють за тим її показником, який набуває найбільшого значення [10].

Найвагомішими чинниками корозійного руйнування зовнішньої поверхні сталевих трубопроводів є: корозійна активність середовища (ґрунтів, атмосфери, води) до металу, дія блукальних струмів, температура труби. За сучасними нормами [2-12] корозійну активність характеризують швидкістю корозії металу у середовищі та/або значенням питомого електричного опору ґрунту, наведеним у табл.1.1.

Корозійна активність	Швидкість корозії	Питомий електричний
середовища	металу, мм/рік	опір ґрунту, Ом∙м
Низька	Менше 0,01	Більше 50
Середня	0,010,30	20 50
Висока	Більше 0,30	Менше 20

Таблиця 1.1. – Корозійна активність середовища до металу трубопроводу

Небезпечними для підземних споруд є блукаючі струми, особливо анодні [2-6]. Впливом катодних блукаючих струмів зазвичай нехтують, хоч за достатньо великих значеннях вони можуть викликати катодне відшарування ізоляційних покриттів і водневе окрихчення сталі [12].

До корозійно небезпечних ділянок відносять заплави річок, зрошувальні землі,

болота і заболочені ґрунти, підводні переходи, промислові і побутові стоки, звалища сміття і шлаку, польові склади мінеральних добрив, ділянки трубопроводу з температурою вище 40°С [8, 10].

1.1.3 Методи і засоби захисту від корозії ПМК

Протикорозійних захист (ПКЗ) ПМК поділяють на активний і пасивний. До активних належить електрохімічний та протекторний захист, оскільки вони характеризуються активним втручанням у процеси корозії [4, 5, 15]. Пасивні методи грунтуються на розділені поверхні ПТ і агресивного середовища покриттями, стійкими до корозії. На практиці найчастіше використовують комплексний захист ПТ, який включає в себе активні і пасивні засоби. В окремих випадках можливе використання, якогось одного засобу захисту, але це має ряд недоліків. При використанні пасивного захисту неможливо добитись ідеально стану покриття ізоляції, оскільки при транспортуванні, укладці ПТ вона пошкоджується. При використанні катодного захисту без ізоляційних покривів значно зростають витрати, бо потрібний більший захисний струм; такий захист наводитиме блукаючі струми на близько розміщенні ПМК [1-11].

У наш час підземні сталеві трубопроводи без захисних протикорозійних заходів не експлуатують [8-11]. При спорудженні на трубопровід наносять ізоляційні покриви. Для зупинення корозії у місцях (практично неминучих) пошкоджень ізоляції застосовують катодну поляризацію. За відносно невеликих витрат на захист час служби ПТ продовжують до 50-100 років [3-5].

Електрохімічним називають захист металу від корозії, який здійснюють поляризацією від зовнішнього джерела струму, яке має більш негативний чи позитивний потенціал, ніж метал, який захищають. Для захисту підземних сталевих споруд найчастіше використовують катодну поляризацію, яку здійснюють накладанням зовнішнього струму; поверхня стає еквіпотенціальною і корозійний струм не протікає. Катодний захист застосовують для запобігання корозії в будь-

якому грунті та в більшості водних середовищ [2-6, 11].

Стороннім джерелом енергії, найчастіше є випрямляч, який перетворює змінний струм промислової частоти у постійний. Конструкцію, яку захищають, з'єднують з негативним полюсом джерела випрямленого струму, так що вона діє як катод. Другий електрод – анодне заземлення з'єднують з позитивним полюсом джерела струму [8].

Установки катодного захисту (УКЗ) розміщують вздовж траси і приєднують до підземного трубопроводу на певних відстанях (від кількох до десятків км) для забезпечення належного ПП по всій довжині ПТ [8, 11]. При цьому потенціал повинен бути на меншим мінімального захисного потенціалу по всій довжині ПТ і не повинен перевищувати максимально допустимого захисного потенціалу (у зонах розміщення УКЗ). Крім того, важливо підтримувати цей потенціал (захищеність у часі). Часті перериви в роботі катодної поляризації призводять до збільшення швидкості корозії, що іноді зводить до нуля ефект захисту.

У ряді випадків за відсутності джерел живлення для випрямляча УКЗ (віддаленість від ліній електропередачі, у пустинних, степових, гірських умовах) використовують генератори, які діють від різних двигунів [11].

Для катодного захисту від корозії використовують також анодні покриття або з'єднані з ПМК локальні аноди. Метал з більш електронегативним електрохімічним потенціалом (протектор) відіграє роль анода а основа – катод. Внаслідок роботи гальванічного елемента метал, що є анодом, під впливом середовища поступово руйнується, захищаючи виріб. Для протекторів найчастіше використовують магній, алюміній і цинк та сплави на їх основі [2, 4, 5].

Катодний захист регулюють шляхом підтримання необхідного захисного потенціалу, який міряють між конструкцією (давачем поляризаційного потенціалу ПП) і електродом порівняння (ЕП). Для ПМК використовують мідносульфатний електрод (МСЕ), розміщений у електролітичному середовищі (ґрунті). Потенціал між ЕП і підзахисною конструкцією, виміряний високоомним вольтметром, містить у собі, крім поляризаційної складової, ще й омічний спад напруги IR, обумовлений проходженням катодного струму I через ефективний опір R між ЕП і металом конструкції. Але тільки поляризація поверхні підзахисної конструкції обумовлює ефект катодного захисту, і тому критерієм захищеності є мінімальний і максимальний захисні (власне поляризаційні) потенціали. Отже, для точного регулювання ПП підзахисної конструкції відносно ЕП з виміряної різниці потенціалів треба вилучати омічну складову[4, 10].

1.2 Контроль ізоляційних покривів

Контроль стану захисних покривів проводять на всіх етапах, починаючи зі спорудження трубопроводу. В умовах експлуатації контролювати стан захисних покривів треба не менше одного разу на рік [8]. Якщо в ізоляції трубопроводу є пошкодження, то їх необхідно негайно усувати, бо при недосконалій катодній поляризації у місцях дефектів ізоляції за 5-6 років можливі корозійні пошкодження трубопроводу, що призводять його до аварійного стану [3].

Перехідний питомий опір ізоляційного покриття є основною величиною, що характеризує якість ізоляції підземного трубопроводу [6-11]. Орієнтовні його значення наведені у табл. 1.2.

Перехідний питомий опір покриття труби рекомендують визначати методом "мокрого" контакту ([2] – с. 239 та [10] – Додаток Г, с. 36-37), за яким на покрив трубопроводу накладають змочений розчином солі контакт з відомою площею S, M^2 , встановлюють між контактом і металом труби різницю потенціалів (наругу) U, B, міряють силу струму I, A, та обчислюють перехідний питомий опір ізоляційного покриву (Ом[•]м²) за формулою

$$\rho_{no\kappa} = \frac{US}{I}.$$
 (1.1)

Цей відомий метод використовують лише у лабораторії чи за наявності доступу до поверхні трубопроводу з ізоляційним покривом перед закопуванням труби або у шурфах (на розкопаній «відкритій» ділянці трубопроводу).

Таблиця 1.2 – Значення опору ізоляції трубопроводу *R_i* залежно від стану покриття

Quiert inorthi	Поникольковид	Орієнтовні межі
ЛКІСТЬ ІЗОЛЯЦІІ	пошкодження	електричного опору, Ом·м ²
Відмінна	Відсутні	>10 000
Добра	Малі одиничні	$10\ 000 \div 2\ 500$
Задовільна	Малі у невеликій кількості	$2\ 500 \div 500$
Погане покриття	Помітні, значні	$500 \div 50$
Дуже погане покриття	Покриття зруйноване	$50 \div 5$

Відомий метод визначення перехідного опору на закінченій будівництвом ділянці ПТ (рис.1.1) за зміщенням різниці потенціалів труба-земля, спричиненим струмом катодної поляризації на кінці ділянки трубопроводу ([2], [10] – Додаток П.1). Для застосування цього способу потрібно щоб ділянка, яку контролюють, не мала контактів металу труби з іншими спорудами; тому цей спосіб не придатний для контролю ПТ у процесі експлуатації.

Для контролю стану захисного покриття ПТ під час експлуатації діюча нормативна документація рекомендує використовувати відомий метод [10] – П.2, с. 65, за яким як джерело постійного струму використовують установку катодного захисту (УКЗ), силу поляризуючого струму I (А) вимірюють амперметром УКЗ, вимірюють потенціал E та поляризаційний потенціал $E_{\text{пол}}$ у всіх пунктах вимірювання зони дії цієї УКЗ.

При цьому поляризаційний потенціал міряють способом переривчастого режиму вмикання-вимикання УКЗ або (якщо пункти вимірювання обладнані електродами порівняння тривалої дії з давачами поляризації) із застосуванням ручного або електромагнітного переривача. Перехідний питомий опір покриття $\rho_{no\kappa}$ (Ом·м²) обчислюють за формулою:

$$\rho_{no\kappa} = \frac{\Delta E_{om}}{j} - \rho_{\delta e s \, no\kappa} \,, \tag{1.2}$$



Рис. 1.1. Схема контролю стану захисного покриття ПТ [10]:
1 – трубопровід; 2 – неізольваний край трубопроводу; 3 – контакти;
4 – резистор; 5 – амперметр; 6 – джерело постійного струму;
7 – тимчасове заземлення; 8 – МСЕ; 9 – мультиметр

де $\Delta \overline{E}_{om}$ – середнє значення омічної складової захисного потенціалу, В, на довжині зони дії однієї УКЗ, яке обчислюють усередненням потенціалів ΔE_{omi} , що розраховують за формулою

$$\Delta E_{om\,i} = \Delta E_{\text{пол}\,i} - E_i\,,\tag{1.3}$$

де E_i – потенціал трубопроводу на і-й ділянці, виміряний (на і-тому пункті вимірювання) після включення УКЗ; $\Delta E_{\text{пол i}}$ – поляризаційний потенціал трубопроводу на і-й ділянці; *j* – густина струму, А/м², яку обчислюють за формулою:

$$j = \frac{I}{\pi DL},\tag{1.4}$$

де *I* – сила струму УКЗ; *D* – діаметр трубопроводу; *L* – довжина трубопроводу, що визначається довжиною зони дії однієї УКЗ (оцінюють за віддаллю між точками з мінімальними захисними значеннями потенціалів по обидва боки від УКЗ); $\rho_{\delta esnok}$ – перехідний питомий опір трубопроводу без покриття, Ом·м², (опір розтіканню струму в ґрунті) знаходять з рівняння

$$\rho_{\delta e s n o \kappa} = \frac{\overline{\rho}_r D}{2} \cdot \ln \frac{0.4 \rho_{\delta e s n o \kappa}}{D^2 H \rho_r}, \qquad (1.5)$$

де $\bar{\rho}_r$ – середній питомий електричний опір ґрунту, Ом·м; ρ_T – питомий поздовжній опір металу трубопроводу (Ом/м), обчислюють за значеннями питомого опору трубної сталі ρ_{ct} , Ом·м, діаметра *D*, і товщини стінки ПТ.

Недоліками цього методу є труднощі визначення опору розтіканню струму в грунті $\rho_{\delta esno\kappa}$ (шляхом розв'язання трансцендентного рівняння (1.5) з використанням параметрів ґрунту і металевої стінки труби) та некоректне визначення густини струму *j* за показом УКЗ. Крім цього некоректно визначають довжину *L* зони дії УКЗ, адже наведений потенціал катодного захисту розподіляється вздовж трубопроводу нерівномірно і локальне його пониження може бути прийняте за край цієї зони [11, 52]. При цьому не відомо скільки (яка частина) струму УКЗ натікає в трубопровід за так вибраним «кінцем зони».

Таким чином, цей відомий метод приводить до деякого значення перехідного опору ізоляції, усередненого по всій зоні дії УКЗ (яка для магістральних трубопроводів становить десятки кілометрів) і може суттєво відрізнятись від реальних значень для окремих ділянок (частин цієї зони). Це унеможливлює використання відомого методу для контролю розподілу опору ізоляції вздовж траси та пошуку місць незадовільної ізоляції ПТ.

Для пошуку місць пошкоджень ізоляції згідно діючої нормативної документації використовують відомі методами Пірсона або поперечного градієнта (рис. 1.2) [7, 10].



Рис. 1.2. Схема визначення місць пошкоджень захисного покриття ПТ [10]: 1 – трубопровід; 2 – пункт вимірювання, через який генератор підєднано до труби; 3 – з'єднувальні проводи; 4 – генератор; 5 – електрод заземлення;

6 – телефони-навушники; 7 – приймач-підсилювач

1.3 Контроль електрохімічного захисту

1.3.1 Поляризаційний потенціал як основний показник ефективності EX3

Залежно від причин, які зумовили поляризацію, її можна поділити на три види: концентраційна, активаційна поляризація і омічне падіння напруги [5, 15, 18].

В основі ефекту зниження корозії при катодній поляризації є електрохімічні процеси, швидкість яких, крім температури та складу середовища, залежить від електродного потенціалу. Відповідна захисному потенціалу густина струму залежить від багатьох факторів, зокрема, і від стану захисного покриття, складу, вологості та електропровідності ґрунту; наявності кисню і т. ін. Тому густина струму не може бути прийнята за критерій захисної дії при електрохімічному захисті (ЕХЗ). Таким чином, поляризаційний потенціал (ПП) є основним критерієм захисної дії ЕХЗ [8].

Емпірично встановлено, що для сталі в грунті ПП становить -0,85 В відносно насиченого мідносульфатного ЕП [2-9]. Цей же ПП (без омічної складової)

прийнятий як мінімальний захисний потенціал для ПТ у нормальних умовах їх залягання. В умовах можливої мікробіологічної корозії, наявності блукаючих струмів, низького опору ґрунту ($\rho \le 10 \text{ Om·m}$) прийнято мінімальний захисний потенціал -0,95 В відносно МСЕ. За високих температур >+80°С мінімальний захисний ПП ПТ за сучасними стандартами прийнято -1,05 В [10].

Практика EX3 показала потребу обмеження найбільш від'ємних допустимих значень захисних потенціалів, що обумовлено необхідністю запобігання руйнування ізолюючих органічних покриттів, яке можливе при катодній поляризації під впливом виділення водню (катодне відшарування), залугнення приелектродного шару і ін. При катодній поляризації у землі поверхня сталі збіднюється киснем, створюються анаеробні умови для біологічного відновлення сульфатів, що може сприяти корозійному розтріскуванню при дії водню [3, 11, 12]. Для ПТ максимально допустимий ПП прийнято (залежно від умов залягання) -1,10 В (або -1,15 В) відносно МСЕ порівняння [10]. При катодній поляризації ПМК потенціал треба контролювати і підтримувати у певній області значень, які забезпечують необхідний захист металу від корозії [10].

1.3.2 Огляд і аналіз методів вилучення омічного складника

Вимірювання ПП пов'язане з проблемою вилучення омічного падіння напруги між поверхнею металу та ЕП, спричиненої проходженням струму через електроліт та покриви металу [4, 15].

У лабораторних умовах для вимірювання електродного потенціалу зразка металу використовують гальваностатичний метод. Для цього потенціометр (вольтметр) з'єднують із зразком зануреного в розчин металу і електродом порівняння, який контактує з розчином через електролітичні ключі (солевий місток, капіляр Габера-Луггіна). Джерело поляризую чого струму підключають до зразка і допоміжного електрода, зануреного у цей же розчин [15].

Досконалішим є потенціостатичний метод міряння залежності густини струму в часі при постійних значеннях потенціалу. Отримують залежність густини струму (сталої при кожному потенціалі) від потенціалу. Задані значення потенціалу підтримують постійними у часі автоматично за допомогою підсилювальногорегулюючого пристрою, на вхід якого подають дві напруги: від пари електродів (робочого і порівняння) та від еталонного джерела. Струм з виходу пристрою подається на комірку і поляризує робочий електрод у напрямі, при якому різниця напруг на вході пристрою стає достатньо малою. При зміні еталонної напруги так же змінюється потенціал робочого Потенціостати електрода. бувають електронномеханічні електронні. Розроблено потенціодинамічний i метод автоматизованої побудови поляризаційних кривих [15].

Для зменшення похибки міряння потенціалу, спричиненої спадом напруги в електроліті, капіляр електрода порівняння розміщують якнайближче до поверхні. Якщо капіляр електроду порівняння неможливо розмістити близько до поверхні зразка, використовують спосіб переривання струму в момент міряння потенціалу. Переривання можливе вібруючим контактом з допомогою камертона, комутатора, електронним пристроєм. Результати міряння потенціалу при різних частотах переривання екстраполюють на безмежну частоту. Перевагою цього комутаційного методу є усунення омічного спаду напруги. Недоліком є виникнення завад при розмиканні, що може призвести до похибок. Поляризація, визначена цим методом, може виявитись меншою, ніж виміряна прямим методом [15].

Для визначення ПП в умовах експлуатації ПТ відома низка методів і пристроїв [1, 4, 10, 20, 58-72]. Релаксаційні методи (вимикання, переключення) потребують обладнання кожної катодної установки (яка діє у зоні вимірювань) спеціальними переривачами – комутаторами і їх синхронізації (рис. 1.3), що ускладнює процедуру вимірювань. Розроблено спеціальні пристрої, які використовують при обстеженнях ПТ за методикою так званих "інтенсивних вимірювань". Міряють різницю потенціалів "метал-земля" при діючих установках катодного захисту та через 0,3 с після їх вимкнення. Вимикачі синхронізують по радіоканалу. Для реалізації релаксаційних методів запропоновано ряд пристроїв [61-67].

Недоліками цих методів і пристроїв є похибки, спричинені затримками моменту міряння, вирівнювальними струмами, гетерогенністю системи метал-ізоляція-ґрунт, блукаючими струмами, які неможливо виключати [1, 58, 68, 69]. Крім цього не завжди вимикачі встановлені на всіх установках, які діють у зоні обстежень. Таким чином, методом вимикання можна визначати поляризаційну складову потенціалу лише на достатньо короткому і добре ізольованому трубопроводі з малим витіканням струму [1, 69].



Рис. 1.3. Схема вимірювання потенціалу поляризації релаксаційним методом: 1 – ПТ; 2 – анодне заземлення; 3 – УКЗ; 4 – МСЕ; 5 – вольтметр; 6 – пункт вимірювання; 7 – переривач; 8, 9 – синхронізатор

За компенсаційним методом між спорудою і додатковим електродом подають струм, величину і полярність якого регулюють, добиваючись відсутності струму через вимірювальний ЕП [1, 69]. Вимірювана напруга врівноважується рівною, але протилежною за знаком напругою, яка створюється струмом на відомому опорі, який
змінюють до того часу поки вимірювана напруга не буде рівною напрузі компенсації. Момент компенсації визначають за відсутністю струму в колі гальванометра. При компенсації поляризуючого струму омічне падіння напруги виключається. Проте компенсуючий струм може змінити потенціал поверхні металу, що контролюють. Крім цього, недоліками компенсаційних способів є складність вимірювальних схем та копітка процедура регулювання [69].

Відомі також способи міряння електродного потенціалу підземної споруди з використанням допоміжного електрода, який встановлюють на рівні залягання підземної споруди, поблизу встановлюють ЕП. Допоміжний електрод електрично з'єднують зі спорудою через спеціальний переривач. Міряють потенціал допоміжного електрода у період його відключення від споруди [2, 4-6].

Недоліком цих способів є потреба стаціонарного розміщення електродів під землею, оскільки проводити земляні роботи при кожному мірянні надто трудомістко. З часом електроди змінюють свій потенціал, що спричинює додаткові похибки. Використання допоміжного електрода дозволяє визначати потенціал споруди лише у що обмежує можливість обстежень, коли місці його встановлення, треба потенціал багатьох контролювати V точках вздовж протяжних споруд (трубопроводів).

Цікавим є спосіб вилучення омічної складової за методом змінного струму [4, 69]. Міряють напругу змінного струму між об'єктом і вимірювальним зондом. Вважають, що при двопівперіодному випрямленні струму (станцією катодного захисту) пульсуючу напругу приблизно можна представляти такою, що коливається за синусоїдальним законом з максимальним значенням U_2 вдвоє меншим від максимального (амплітудного) значення U_1 напруги пульсацій; тоді при мірянні ефективного значення

$$U_1 = 2U_2 = 2\sqrt{2U_{2e\phi}}.$$
 (1.6)

Середнє значення синусоїдально змінної величини

$$U_0 = \frac{2U_1}{\pi}.$$
 (1.7)

Отже омічний спад напруги оцінюють як

$$U_{c} = 4\sqrt{2} \frac{U_{2e\phi}}{\pi} \approx 1.8 U_{2e\phi} \,. \tag{1.8}$$

За поляризаційний потенціал приймають різницю між напругою "споруда-зонд" та приблизно визначеним омічним падінням напруги

$$U_p = U_{c.3.} - 1.8U_{2e\phi}.$$
(1.9)

Недоліком цього способу є обмежена придатність його використання лише для споруд з малою індуктивністю (для резервуарів та дуже коротких трубопроводів), коли не згладжуються пульсації випрямленого струму і справедливе початкове співвідношення між постійною і змінною складовими.

Отже, методи визначення ПП ПТ потребують удосконалення.

1.3.3 Огляд і аналіз засобів для вимірювання різниці потенціалів

До приладів вимірювань різниці потенціалів належать вольтметри, мілівольтметри та мультиметри досить широкого сортаменту [4, 8, 70-72]. Застосовують ці прилади та обладнання для оцінки захищеності трубопроводів від корозії, оцінки небезпеки корозії згідно визначених потенціалів і їх складових. Крім того, їх використовують для оцінки стану захисного покриття.

Ампервольтметр М-231 магнітоелектричної системи ("Электроточприбор", РФ) із стрілковим індикатором призначений для вимірювань постійних струмів і напруг 0,5…50 В при температурі від -30°С до +40°С; похибка 1,5%.

Мультиметр цифровий спеціалізований 43313 для вимірювань потенціалів на підземних металевих спорудах відносно електрода порівняння та напруги і сили струму. Основна похибка 2,5 %.

Цифровий вимірювач ИРПЦ-100 ("Кром", Україна) забезпечує вимірювання різниці потенціалів 0,1...100 В з автоматичним вибором межі вимірювань та індикацією полярності; має звукову сигналізацію з періодом 10 сек для вимірювань у зоні блукаючих струмів. Основна похибка 1,5 %.

Портативний прилад ВП-2 (ФМІ НАНУ, м. Львів) [11, 47, 49, 52] для міряння різниці потенціалів 0,001...199,9 В «метал-ґрунт» або «ґрунт-ґрунт» (градієнта потенціалу) і ін. під час контролю електрохімічного захисту від корозії підземних трубопроводів та інших металевих конструкцій і споруд (рис. 1.4). Вольтметром для міряння різниці потенціалів ПТ споряджена апаратура типу БІТ-3, БІТ-КВ, БІТ-КВП [11, 42-49, 52, 54]. Портативні прилади ОРТ+В і ОРТ+В2 (ФМІ НАН України, м. Львів) [11, 60] для безконтактного визначення місцезнаходження, напряму і глибини залягання ПТ та інших струмопровідних комунікацій, а також для вимірювань різниці потенціалів і змінних електричних напруг при обстеженнях ПТ (рис. 1.5).





Рис. 1.4. Портативний прилад ВП-2 для контролю ЕХЗ.

Рис. 1.5. Портативні прилади для визначення місця ПТ, та контролю EX3: *a* – OPT+B: *б* – OPT+B2.

Вимірювач електричних потенціалів ИПП-1 "Менделеевец" ("Квазар", РФ) призначений для вимірювання захисного і поляризаційного потенціалів підземної споруди, що знаходиться під дією катодного захисту [70]. Метод вимірювання

поляризаційного потенціалу - комутація (відключення) допоміжного електрода по ГОСТ 9.602-2005 (рис. 1.6*a*).

Аналізатор потенціалів "Поиск-01" ("Парсек", РФ) дає змогу одночасно вимірювати потенціали газопроводу "ввімкнуто-вимкнуто", значення градієнта. Має дальномір, клавіатуру для кометарів і пам'ять. Вимірює потенціали при синхронній та несинхронній роботі переривачів струму УКЗ. Результати через СОМ-порт переписують у ПК (рис. 1.66).

Універсальний вимірювач ПРИМА-2005 ("Кром", Україна) [71] забезпечує вимірювання різниці потенціалів ±0,001–±10 В і виміру поляризаційного потенціалу відповідно до ДСТУ 4219-2003, з можливістю обробки отриманих результатів вимірів на ПК. Основна похибка 0,5 % (рис. 1.6*в*).



Рис. 1.6 Прилади для вимірювання захисного і поляризаційного потенціалів: *а* – ИПП-1 "Менделеевец"; *б* – "Поиск-01"; *в* – "ПРИМА-2005"; *г* – "MoData".

Прилад мобільного збирання даних "MoData" (Weilekes elektronik, Німеччина) [72] складається з вологозахищеного комп'ютера та багатофункціонального перетворювача. Вимірює потенціали при ввімкнутих і вимкнутих установках, градієнти потенціалів, напруги (постійну і змінну), струм на внутрішніх та зовнішніх шунтах, опір постійному струму, опір грунту. За спеціальною програмою проводиться обробка даних вимірювань та будуються графіки потенціалів (рис. 1.6*г*).

Різновидність електролітичних середовищ і вимог до потенціометричних експериментів та контролю в лабораторній і технологічній практиці зумовлюють використання різних ЕП (табл. 1.3) [2, 51].

	Doomin	Потенціал	Температурний	Область
слектрод портвняння	гозчин	по н. в. е., В	коеф., мВ/К	застосування
Нормальний (станд.)	$H_2 SO_4$	0		Лабораторні
водневий (н. в. е.)	$a_{H^+} = 1$	0	-	дослідження
Каломельні:	0,1 M KCl			Нейтральні
0,1 М к. е.,	Насич.	0,337	0.65	середовища,
насичений к.е.	KC1	0,244	-0,03	хлоридмісткі
Хлорсрібний				Те ж, кислі
(нас. х. с. е.)	Те ж	0,201	1	середовища
Minuoaun hamuun	Цааннаний			Грунти, природна
(и с с)	Сихо	0.21 + 0.22	0.0	вода, нейтральні і
(M. C. C.)	CuSO ₄	$0,51 \div 0,52$	0,9	слабокислі води
1М ртутно-				
сульфатний	1 M H.SO.	0.674		Розници кислот
(1M p. c. e.)	1 WI 112504	0,074	-	Т ОЗЧИНИ КИСЛОТ
Ртутно-окисний	NaOH	0,92÷0,06		Doomunu murin
(p. o. e.)	(pH > 7)	pН	-	гозчини лугтв

Таблиця 1.3 – Найбільш уживані електроди порівняння у водних середовищах

На практиці для вимірювання ПП найчастіше використовують мідносульфатні електроди порівняння. Тому для зменшення похибки вимірювання потенціалу не обхідно дотримуватись правил експлуатації МСЕ а також уникати факторів, що впливають на параметри електрода [2]. До зовнішніх факторів які негативно впливають на роботу МСЕ належать похибки спричинені впливом температури, світла, порушенням контакту електрода з ґрунтом або не дотриманням правил технічного обслуговування. Слід зазначити, що стаціонарні ЕП менш схильні до зовнішніх впливів ніж переносні.

1.4 Визначення поляризаційного потенціалу ПМК за вимірами постійних і змінних електричних напруг

Вказані недоліки відомих методів можна усунути застосуванням запропонованого у ФМІ методу визначення ПП з вилученням омічного складника за вимірами постійних і змінних електричних напруг [51, 58].

Суть методу пояснює схема розміщення і приєднання електродів для вимірювання ПП, показана на рис. 1.7 Міряють постійну різницю потенціалів U_{mg} і змінну напругу V_{mg} між металом ОК і розміщеним у середовищі ЕП (перемикач у положенні П1) та аналогічно – U_{gg} і V_{gg} між ЕП і допоміжним електродом ДЕ (перемикач П2).



Рис. 1.7 Схема міряння поляризаційного потенціалу: ОК – об'єкт контролю; П1-П2 - перемикач; V – вольтметр; ЕП – електрод порівняння; ДЕ – допоміжний електрод

За цими вимірами визначають ПП за формулою

$$U_{p} = U_{mg} - V_{mg} \cdot U_{gg} / V_{gg}.$$
(1.10)

Відношення V_{gg} / U_{gg} є виміряний коефіцієнт гармоніки.

В якості джерела тестуючого струму для визначення омічного складника використовуємо змінну компоненту пульсуючого струму УКЗ. У випадках, коли металоконструкцію поляризують постійним струмом, для застосування цього методу контролю достатньо модулювати струм на виході джерела змінною складовою низької частоти. Можна також використати генератор (модулятор) струму, підключений до заземлення і металоконструкції.

За останні роки для реалізації цього методу запропоновано низку пристроїв [59, 60]. Пристрій [59] для вимірювань складових потенціалу підземної металевої споруди в зонах дії установок катодного захисту містить блок вимірювання і розрахунку, з пам'яттю та інтерфейсами, мультиплексор аналогових сигналів для вибору режиму вимірювань (на постійному або на змінному з частотою 100 Гц струмі) шляхом почергової комутації входів вимірювального приладу з аналоговими вимірювальними каналами.

Недоліком цього пристрою є відсутність можливості одночасного вимірювання на постійному і змінному струмі по двох входах. Почергові вимірювання чотирьох величин (за якими визначають поляризаційний потенціал) потребують затрат певного часу, протягом якого значення вимірюваних величин чи співвідношення між ними може змінитись що призводить до похибок визначення поляризаційного потенціалу.

У ФМІ НАН України розроблено портативний прилад ОРТ+В2 для визначення розміщення та контролю протикорозійного захисту ПТ [60], який у частині вимірювача потенціалів складається з двох вхідних клем, з'єднаного з ними високоомного дільника, вихід якого з'єднано з входом підсилювача каналу вимірювання постійної напруги, роздільного конденсатора, з'єднаного з вхідними клемами, та послідовно з'єднаних з ним вхідного підсилювача змінної напруги, смугового фільтра і випрямляча каналу вимірювання змінної напруги, ключа з двома входами і одним виходом, послідовно з'єднаного з ним аналого-цифрового перетворювача і цифрового індикатора. Перший вхід ключа з'єднано з виходом підсилювача каналу вимірювання постійної напруги а другий вхід з'єднано з виходом випрямляча каналу вимірювання змінної напруги. Пристрій скомпонований у мало габаритному корпусі і містить у собі блок живлення, який через перемикач режимів роботи з'єднаний з підсилювачами, активними фільтром і випрямлячем та з ключем.

Для вимірювань потенціалу ПТ чи іншого металевого об'єкту з'єднують з ним плюсову клему пристрою а мінусову клему – з ЕП. У першому положенні ключа приладу міряють постійну напругу (різницю потенціалів) «метал-земля» U_{mg} а у другому – змінну напругу V_{mg} . За приєднання клем пристрою до двох встановлених на поверхні землі ЕП міряють постійну і змінну напруги «земля-земля» U_{gg} і V_{gg} . Ці виміри використовують для визначення місць пошкоджень ізоляції ПТ за методом Пірсона (V_{mg} і V_{gg}), для контролю ЕХЗ за різницею потенціалів труба-земля U_{mg} (з омічною складовою) і «поперечним градієнтом» U_{gg} та поляризаційним потенціалом (ПП), який обчислюють за формулою (1.10),

де другий член є омічною складовою різниці потенціалів «метал-ЕП». Таким чином OPT+B2 дає змогу проводити різні виміри, за якими можна контролювати як пасивний (ізоляційні покриви), так і активний (ЕХЗ – катодну поляризацію) захист від корозії ПТ.

Недоліком OPT+B2, як і попереднього пристрою [59] є відсутність можливості одночасних вимірювань постійних і змінних напруг та їх автоматичного опрацювання, що знижує продуктивність обстежень і може призводити до похибок визначення поляризаційного потенціалу, спричинених можливими змінами вимірюваних компонент та помилками обчислень.

Висновки по розділу 1

1. Для підвищення надійності і продовження термінів безаварійної експлуатації ПМК на практиці використовують комплексний захист, який включає в себе захисні покриття та електрохімічний захист. При захисті підземних сталевих споруд найчастіше використовують катодну поляризацію, за якої поверхня металу не руйнується в агресивному середовищі протягом тривалого часу.

2. Основним критерієм, за яким оцінюють ступінь захищеності конструкції при катодному захисті, є нормативні значення поляризаційного потенціалу поверхні металу конструкції в електропровідному середовищі. При практичних вимірюваннях різниці потенціалів між металом і електродом порівняння маємо суму поляризаційного потенціалу (ПП) і омічного спаду напруги, який є систематичною похибкою. Для вилучення омічного складника використовують низку методів, які мають недоліки.

3. Оглядом і аналізом наукової літератури і нормативно-технічної документації встановлено недоліки відомих методів визначення поляризаційного потенціалу металевих споруд в електропровідному середовищі та обґрунтовано доцільність розроблення і використання нового методу і апаратури.

4. Актуальною і практично важливою задачею для діагностування і контролю стану протикорозійного захисту (ПКЗ) ПМК є розроблення нових досконаліших методів і засобів вимірювання поляризаційного потенціалу.

5. Для вирішення цієї задачі необхідно обґрунтувати метод визначення поляризаційного потенціалу за вимірами постійних і змінних електричних напруг; розробити апаратуру для вимірювального контролю ПП та стану захисного покриття ПТ; розвинути комплексний метод і засоби контролю ПКЗ ПТ за вимірами струму, потенціалів і координат.

РОЗДІЛ 2

РОЗВИТОК ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО МЕТОДУ КОНТРОЛЮ ПРОТИКОРОЗІЙНОГО ЗАХИСТУ ПІДЗЕМНИХ ТРУБОПРОВОДІВ

Для обґрунтування методу вимірювання поляризаційного потенціалу поверхні металу в електропровідному середовищі проаналізуємо заступну електричну схему структури "метал-ізоляція-електропровідне середовище", дослідимо залежності електромагнітного поля металевого циліндра з ізоляцією від параметрів середовища і частоти поля, розглянемо електрофізичні характеристики міжфазного шару.

2.1 Феноменологічні схеми межі металу трубопроводу з ізоляційним покриттям в електропровідному середовищі

Підземний трубопровід зобразимо довгою лінією з розподіленими параметрами і використаємо еквівалентні електричні схеми заміщення ділянки трубопроводу [9, 42, 73 - 75], який представляється довгою коаксіальною лінією, де труба є внутрішнім провідником, а ґрунт – зовнішнім провідником. Вважатимемо, що дефекти ізоляції заповнені електролітом і розподілені рівномірно по довжині трубопроводу. Основними параметрами трубопровідної лінії є поздовжній опір – імпеданс та поперечна провідність – адмітанс (які загалом називають – імітанс) та їх складові. Загальна еквівалентна електрична схема заміщення ділянки ПТ з основними компонентами поздовжнього імпедансу та поперечного адмітансу [9] показана на рис. 2.1.

Поздовжній повний комплексний опір – імпеданс трубопровідної лінії складається з послідовно з'єднаних активних та індуктивних опорів труби і ґрунту

$$Z = R + i\omega L = \left(R_T + R_g\right) + i\omega \left(L_T + L_g + L_e\right), \qquad (2.1)$$

де R_T , R_g – активні погонні опори труби і оточуючого ґрунту; L_T , L_g – внутрішні (труби і ґрунту) та L_e – зовнішня міжпровідникова індуктивність.

На основі розвинутої електродинамічної моделі коаксіальної трубопровідної лінії були проведені розрахунки параметрів схеми ПТ і зіставлення їх внесків у імпеданс та адмітанс трубопровідної лінії [9] для побудови алгоритмів визначення складових перехідного опору трубопроводу з метою контролю стану ізоляційного покриття ПТ. Значення параметрів були обчислені за формулами, виведеними з урахуванням умов, які маємо при обстеженнях ПТ у діапазоні частот $f = 1 \dots 1500 Hz$ [42].



Рис. 2.1. Феноменологічна електрична схема ділянки підземного трубопроводу: R_T , R_g – активні поздовжні опори труби і ґрунту;

 L_T , L_g – індуктивності труби і ґрунту;

*G*_i, *C*_i – провідність і ємність ізоляційного шару;

 G_p , C_p – провідність і ємність поляризації;

*G*_d – провідність пошкоджень (дефектів) ізоляції;

 G_g , C_g – поперечна електропровідність та ємність середовища (грунту)

Повна поперечна комплексна провідність – адмітанс трубопровідної лінії визначається її конструкцією і умовами роботи; на одиницю довжини лінії маємо

$$Y = G + i\omega C = Y_g \left(Y_i + Y_d \right) \left(Y_g + Y_i + Y_d \right),$$
(2.2)

де *Y_g*, *Y_i*, *Y_d* – повні провідності ґрунту, ізоляції і дефектів (пошкоджень) ізоляції, в яких метал труби контактує з ґрунтом.

Повні провідності ізоляції і дефектів ізоляції [9] такі:

$$Y_i = G_i + i\omega C_i,$$

$$Y_d = G_d \left(G_n + i\omega C_n \right) / \left(G_d + G_n + i\omega C_n \right),$$
(2.3)

де $G_n = S_n/R_n$ – поляризаційна провідність; $C_n = C_{dc}S_d$ – ємність подвійного електричного шару на границі метал-електроліт у дефектах ізоляції, яка залежить від потенціалу поляризації, складу електроліту та інших причин (для сталевих ПТ [73] приймають $C_{dc} = 0.25 \div 0.6 \text{ F/m}^2$); S_d – сумарна площа дефектів ізоляції на одиницю довжини трубопроводу; R_p – питомий опір поляризації у дефектах ізоляції; C_{dc} – питома ємність ізоляційного шару.

Активна провідність ізоляції складається з гальванічної провідності ізоляції та провідності діелектричних втрат

$$G_i = G_{ig} + G_{id} \,, \tag{2.4}$$

$$G_{ig} = \pi D_T / R_{i\Pi}, \quad G_{id} = \omega C_i \operatorname{tg} \delta,$$
 (2.5)

де $R_{i\Pi}$ – питомий перехідний опір одиниці площі ізоляційного покриття з врахуванням дрібних дефектів та вологонасичення; C_i – ємність ізоляційного шару на одиницю довжини трубопроводу; tg δ – тангенс кута діелектричних втрат в ізоляції. На частотах сигналу менших 1000 Hz провідність діелектричних втрат G_{id} становить не більше 3% від гальванічної, отже нею можна нехтувати. Початкові значення перехідного опору ізоляційного шару ПТ (після завершення його вологонасичення) становить для бітумних покривів 2 ÷ 3 kOm·m², для плівкових полімерних 5 ÷ 10 kOm·m².

Для оцінки ємності ізоляційного покриття одиниці довжини трубопроводу використовують відому формулу для коаксіального кабелю [9]

$$C_i = 2\pi \varepsilon_i \varepsilon_0 / \ln(1 + 2d_i / D_T), \qquad (2.6)$$

де ε_i – відносна діелектрична проникність ізоляційного матеріалу з врахуванням вологонасичення; $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m – діелектрична стала. Для труб великого діаметра з тонким шаром ізоляції цю формулу можна спростити: $C_i \approx 27,8 \cdot 10^{-9} \cdot \varepsilon_i D_T/d_i$. Проте у цих формулах не враховано вплив проникнення EM поля у середовище на електричну ємність ПТ.

Через імітанси (первинні параметри) визначають характеристики лінії – вторинні параметри [9, 42]: коефіцієнт передавання (стала поширення) та хвилевий (характеристичний) опір

$$\gamma = \alpha + i\beta = \sqrt{ZY}, \qquad Z_x = \sqrt{Z/Y}, \qquad (2.7)$$

який для однорідної по довжині лінії не залежить від її довжини і однаковий у довільній її точці. Виділивши в γ дійсну і уявну частини [9], маємо коефіцієнти заникання і фази

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \left(GR - \omega^2 LC\right) + \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\left(R^2 + \omega^2 L^2\right) \left(G^2 + \omega^2 C^2\right)}},$$
(2.8)

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \left(\omega^2 L C - G R\right) + \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\left(R^2 + \omega^2 L^2\right) \left(G^2 + \omega^2 C^2\right)}}.$$
(2.9)

Через фазову сталу визначають довжину хвилі $\lambda = 2\pi/\beta$ і швидкість поширення фази хвилі $v = \omega/\beta = \lambda f$ вздовж лінії.

Названі характерні величини піддаються вимірюванням і, отже, їх можна використовувати для визначення первинних параметрів ПТ. Для цього на основі розв'язків задач електродинаміки встановлюють зв'язки інтегральних параметрів трубопровідної лінії з геометричними і електричними параметрами ПТ [9].

Проаналізуємо загальну поперечну провідність феноменологічної електричної схем ділянки ПТ [94] (рис 2.2*а*). Наявні дефекти (пори) в ізоляції вважаємо розподіленими рівномірно по поверхні трубопроводу. В місці проникання ґрунтової вологи до поверхні металу, внаслідок електрохімічних процесів на границі метал–електроліт ґрунту, виникає подвійний електричний шар [15, 18, 75–77].





б – для постійного струму; в – для змінного струму

Розглянемо окремо проходження постійного і змінного струмів. При постійному струмі заступна електрична схема спроститься так, як показано на рис 2.26. Провідність ланки від поверхні металу до грунту буде визначатись сумою:

$$G_{mg} = G_i + G_p, \qquad (2.10)$$

а падіння напруги на цій ланці

$$U = \frac{I}{G_i + G_p}.$$
(2.11)

На постійному струмі падіння напруги на межі металу з ізоляційним покриттям в електропровідному середовищі складається з поляризаційної і омічної складових. Як показали проведені розрахунки [42], при хорошій ізоляції буде виконуватись нерівність $G_i \ll G_p$.

Як показали результати попередніх досліджень [42], у випадку змінного струму у провідності ізоляції, при реальних для ПТ значеннях перехідного опору ізоляції 0,5÷ 10 kOm·m², ємнісна провідність ізоляції (при невисоких частотах) буде набагато менша її активної провідності:

$$G_i >> |\omega C_i|. \tag{2.12}$$

Цьому випадку відповідає схема, показана на рис.2.2*в*. Значення частоти, за якої ця нерівність виконується, необхідно уточнити. Для цього нижче дослідимо залежності ємності металевого циліндра з ізоляцією в електропровідному середовищі від електромагнітних і геометричних параметрів структури та частоти поля.

Проведені розрахунки показали [42], що при частоті більшій 100 Hz в поперечній провідності, обумовленій дефектами в ізоляції, в діапазоні провідностей ґрунту $10^{-1} \div 10^{-3} Om^{-1}m^{-1}$ і при наявності дефектів площею порядку $10^{-6} m^2$ і більше на одному метрі довжини трубопроводу ємнісна складова поляризаційної провідності ωC_p набагато перевищує її активну складову, це зберігається і при знижені частоти до десятків Герц. Отже на змінному струмі ємнісна провідності подвійного шару в місті дефекту, шунтує його активну поляризаційну провідність, тобто маємо

$$G_p \ll \omega C_p \tag{2.13}$$

Тому на змінному струмі у загальному падінні напруги між металом з ізоляційним покриттям і встановленим в електропровідному середовищі ЕП переважатиме омічна складова (рис.2.2*в*), при цьому поляризаційною провідністю можна нехтувати [69, 75, 78-81].

Таким чином, якщо значення амплітуди змінної напруги привести до значення постійної напруги, то різниця між падінням напруги при постійному струмі (рис.2.26) і падінням напруги при змінному струмі (рис.2.2*в*), за формулою (1.10), дорівнюватиме поляризаційній складовій різниці потенціалів (поляризаційному потенціалу), або в математичній формі

$$U_{p} = U_{mg} - k^{-1} V_{mg}, \qquad (2.14)$$

де k – коефіцієнт гармоніки змінного струму, що натікає у трубопровід на даній ділянці. Коефіцієнт гармоніки можна оцінити теоретично [4], якщо відомі співвідношення напруг. В реальних умовах співвідношенням змінної і постійної напруг пропонується визначити за їх вимірами у ґрунті поперек траси ПТ $k=V_{gg}/U_{gg}$ [58, 78 - 81].

Об'єднуючи вирази (2.12) і (2.13), після не складних математичних перетворень, отримуємо співвідношення для робочої частоти вимірювання ПП:

$$\frac{1}{C_i R_i} \gg \omega_M \gg \frac{1}{C_p R_p}$$
(2.15)

де *C_i* і *C_p* – ємність ізоляції і подвійного електричного шару, значення яких для реальних умов експлуатації ПТ потрібно визначити.

Таким чином, на змінному струмі нам потрібно вибрати таку частоту, коли вже не проявляється поляризаційний опір границі метал-середовище і ще не проявляється ємнісна (реактивна) складова провідності ізоляційного шару (оточеного ґрунтом) у порівнянні з омічною (активною) складовою провідності цього ж реального ізоляційного шару ПТ в умовах експлуатації.

Для визначення діапазону частот (2.15), в якому правомірне застосування запропонованого методу вимірювань ПП, використаємо відомі в науковотехнічній літературі діапазони значень опору ізоляції ПТ R_i і поляризаційного опору R_p та теоретично дослідимо залежності електричної ємності ПТ від параметрів ізоляції, середовища та частоти поля з урахуванням проникнення ЕМ поля в ґрунт та проаналізуємо поляризаційну ємність (ємність подвійного електричного шару) як електрофізичного параметру міжфазного шару.

2.2 Рівняння і складові електромагнітного поля трубопроводу

Теоретичною основою методів і засобів обстежень підземних трубопроводів служить триєдина математична модель електромагнітного поля (ТЄММ ЕМП) трубопроводу, яка базується на розв'язаннях крайових задач електродинаміки, теорії електричних кіл з розподіленими параметрами та розрахунках магнітного

поля електричних струмів [9]. Електродинамічна модель трубопроводу як циліндричної структури, з урахуванням реальних геометричних і електромагнітних параметрів та умов на границях розділу середовищ, дає загальний опис електромагнітного поля об'єкта. Протяжний ізольований трубопровід разом із землею, як зворотним проводом, можна також розглядати як електричну трубопровідну лінію, розподілені параметри якої визначають на основі розв'язків електродинамічних крайових задач. Для ефективних досліджень вимірюваних характеристик поля, створеного струмами, що протікають по трубопроводах, використовуємо представлення їх лінійними струмопроводами.

Металевий трубопровід, покритий шаром ізоляції і розміщений в електропровідному середовищі, є багатошаровою циліндричною структурою. Електромагнітне поле у кожній точці простору і часу описують вектори напруженості електричного \vec{E} і магнітного \vec{H} полів, які задовольняють рівняння Максвелла і крайові умови неперервності компонент поля, дотичних до границь розділу частинних областей структури, та зменшуються до нуля зі збільшенням відстані від структури до безмежності [9, 82-85]. Обмежуємось розглядом монохроматичного поля з частотою $\omega=2\pi f$; довільно змінне в часі поле можна представити розкладом в інтеграл Фур'є по частотах. Рівняння Максвелла зводять до рівняння Гельмгольца для векторного потенціалу Герца [83]

$$\Delta \Pi + k^2 \Pi = 0, \qquad (2.16)$$

де хвильове число середовища

$$k = \omega \sqrt{\epsilon \mu - i\mu \sigma / \omega} \tag{2.17}$$

характеризує його електромагнітні параметри (для кожної з підобластей структури).

У циліндричній системі координат (r, φ, z) з віссю z направленою вздовж осі труби поле описують поздовжніми складовими електричного Π_z^E і магнітного Π_z^M векторів Герца (поляризаційні вектор-потенціали), через які виражають усі шість компонент напруженості електромагнітного поля [9, 83]. Проте, для трубопроводу з ізоляційним покривом, розміщеного в однорідному середовищі (тобто для структури з круговою симетрією) достатньо обмежитись одною поздовжньою складовою Π_z^E електричного вектора Герца, яку представляють розкладом по елементарних просторових хвильових функціях для кожної з підобластей структури [9, 51].

Поле зовні трубопроводу (в області c), спричинене струмом J_0 , що протікає вздовж трубопроводу (у металевій стінці труби), описують [9] виразом

$$\Pi_{zc}(r,\varphi,z,t) = J_0 \int \sum_n B_n(k_l,a_l,\gamma) \cdot H_n^2(v_c r) \cdot e^{in\varphi - i\gamma z} e^{i\omega t} d\gamma, r > a_i, \qquad (2.18)$$

де ω – частота зміни струму; γ – поздовжнє хвильове число характеризує передавання поля конкретної хвилі вздовж структури; k_l , v_l – хвилеві числа підобластей; B_n – комбінації функцій Бесселя за граничними умовами описують електромагнітні і метричні параметри структури, їх вирази наведені у [9] і в цитованих там працях; $H^2_n(vr)$ – функції Ганкеля.

Відмітимо, що у загальному випадку хвилі електричного і магнітного типів (які описуються складовими Π_z^E і Π_z^M) зв'язані між собою [9, 42] і маємо гібридні хвилі. Тоді треба враховувати всі шість компонент напруженості поля.

При розгляді поля підземного трубопроводу (ПТ) представимо його як порожнистий циліндричний провідник з шаром ізоляції в однорідному зовнішньому середовищі (рис. 2.3).

Для циліндричних структур з хвилями, що характеризуються постійною поширення *γ*, маємо [9, 42]:

$$E_z = v^2 \sum_n R_n^E \Phi_n^E, \qquad (2.19)$$

$$E_{r} = -i\gamma \sum_{n} R_{n}^{E'} \Phi_{n}^{E} - \frac{i\omega\mu}{r} \sum_{n} R_{n}^{M} \Phi_{n}^{M'}, \qquad (2.20)$$

$$E_{\varphi} = -\frac{i\gamma}{r} \sum_{n} R_{n}^{E} \Phi_{n}^{E'} + i\omega\mu \sum_{n} R_{n}^{M'} \Phi_{n}^{M}, \qquad (2.21)$$

$$H_z = \gamma^2 \sum_n R_n^M \Phi_n^M , \qquad (2.22)$$

$$H_{r} = \frac{ik^{2}}{\omega\mu r} \sum_{n} R_{n}^{E} \Phi_{n}^{E'} - i\gamma \sum_{n} R_{n}^{M'} \Phi_{n}^{M}, \qquad (2.23)$$

$$H_{\varphi} = \frac{k^2}{i\omega\mu} \sum_{n} R_n^{E'} \Phi_n^E - \frac{i\gamma}{r} \sum_{n} R_n^M \Phi_n^{M'}, \qquad (2.24)$$

де v – поперечне хвилеве число визначається формулою $v_j^2 = k_j^2 - \gamma^2$, γ – поздовжнє хвилеве число характеризує поширення поля хвилі вздовж структури $e^{i\omega t - i\gamma z}$, $k_j = \sqrt{\omega^2 \varepsilon_j \mu_j - i\omega \mu_j \sigma_j}$ – хвилеве число середовища характеризує електромагнітні параметри для кожної з підобластей структури, $\omega = 2\pi f$ – частота поля.



Рис. 2.3. Металевий циліндр з ізоляцією в електромагнітному полі струму

Розглядаємо симетричну ТМ хвилю, для якої

$$n = 0,$$

$$\Phi_n^M(\varphi) = 0,$$

$$\Phi_n^E(\varphi) = 1.$$
(2.25)

Тоді з виразів (2.19)-(2.24) отримаємо наступні співвідношення для складових електромагнітного поля металевого циліндра з ізоляцією:

$$E_{z} = v^{2} R_{0}^{E};$$

$$E_{r} = -i\gamma R_{0}^{E'};$$

$$E_{\varphi} = 0;$$

$$H_{z} = 0;$$
(2.26)

$$H_{r} = 0;$$

$$H_{\varphi} = \frac{k^{2}}{i\omega\mu} R_{0}^{E'};$$
(2.27)

Радіальні функції для внутрішньої області (ізоляційного шару), та зовнішньої області (середовища) мають відповідно вигляд

$$R_{i0}(r) = A_0 J_0(v_i r) + B_0 N_0(v_i r),$$

$$R_{e0}(r) = D_0 H_0^{(2)}(v_e r),$$
(2.28)

де *J*₀ – функція Бесселя; *N*₀ – функція Неймана.

Таким чином, складові ЕМ поля трубопроводу (їх комплексні амплітуди [82-86]) описуються наступними виразами в області ізоляції (*a_i≤r≤a_e*):

$$E_{z_i} = v_i^2 A_0 J_0(v_i r) + v_i^2 B_0 N_0(v_i r), \qquad (2.29)$$

$$E_{r_i} = -i\gamma A_0 J_0'(v_i r) - i\gamma B_0 N_0'(v_i r), \qquad (2.30)$$

$$H_{\varphi_{i}} = \frac{k^{2}}{i\omega\mu} A_{0} J_{0}'(v_{i}r) + \frac{k^{2}}{i\omega\mu} B_{0} N_{0}'(v_{i}r); \qquad (2.31)$$

у зовнішньому середовищі (*r≥a_e*):

$$E_{z_e} = v_i^2 D_0 H_0^{(2)}(v_e r), \qquad (2.32)$$

$$E_{r_e} = -i\gamma D_0 H_0^{\prime(2)}(v_e r), \qquad (2.33)$$

$$H_{\varphi e} = \frac{k^2}{i\omega\mu} D_0 H_0^{\prime(2)}(v_e r).$$
(2.34)

Невідомі коефіцієнти визначаємо з неперервності тангенціальних компонент на границях розділу середовища. У нашому випадку такими компонентами є H_{φ} і E_z . Третє рівняння отримуємо із закону повного струму

$$2\pi a_i H_{\varphi} = j_z , \qquad (2.35)$$

де *j*_z – сила струму, що протікає вздовж циліндра у його стінці.

ſ

$$\begin{cases} E_{zi}(a_{e}) = E_{ze}(a_{e}) \\ H_{\varphi i}(a_{e}) = H_{\varphi e}(a_{e}) = \\ 2\pi a_{i}H_{\varphi i}(a_{i}) = j_{z} \end{cases} \begin{cases} v_{i}^{2}A_{0}J_{0}(v_{i}a_{e}) + v_{i}^{2}B_{0}N_{0}(v_{i}a_{e}) = v_{e}^{2}D_{0}H_{0}^{(2)}(v_{e}a_{e}) \\ \frac{k_{i}^{2}}{i\omega\mu_{i}}\left(A_{0}J_{0}'(v_{i}a_{e}) + B_{0}N_{0}'(v_{i}a_{e})\right) = \frac{k_{e}^{2}}{i\omega\mu_{e}}D_{0}H_{0}^{(2)'}(v_{e}a_{e}) \end{cases} (2.36)$$

Розв'язком системи рівнянь (2.36) щодо невідомих коефіцієнтів [85] є:

$$A_{0} = -\frac{1}{K_{ie}} i\omega j_{z} \mu_{i} \left(k_{i}^{2} v_{e} \mu_{e} N_{1} \left(v_{i} a_{e} \right) H_{0}^{(2)} \left(v_{e} a_{e} \right) - k_{e}^{2} v_{i} \mu_{i} N_{0} \left(v_{i} a_{e} \right) H_{1}^{(2)} \left(v_{e} a_{e} \right) \right),$$
(2.37)

$$B_{0} = \frac{1}{K_{ie}} i\omega j_{z} \mu_{i} \left(k_{i}^{2} v_{e} \mu_{e} J_{1} \left(v_{i} a_{e} \right) H_{0}^{(2)} \left(v_{e} a_{e} \right) - k_{e}^{2} v_{i} \mu_{i} J_{0} \left(v_{i} a_{e} \right) H_{1}^{(2)} \left(v_{e} a_{e} \right) \right),$$
(2.38)

$$D_0 = \frac{1}{K_{ie}} i\omega j_z v_i \mu_i \mu_e (J_1(v_i a_e) N_0(v_i a_e) - J_0(v_i a_e) N_1(v_i a_e)).$$
(2.39)

Для усіх циліндричних функцій [86-88] справедливе рекурентне співвідгошення

$$\frac{d}{dx}\left(x^{n}Z_{n}\left(kx\right)\right) = kx^{n}Z_{n-1}\left(kx\right)$$
(2.40)

Зокрема, при *n*=0 маємо $Z_0'(x) = -Z_1(x)$.

Для дослідження впливу електрофізичних параметрів на розподіл складових електромагнітного поля металевого циліндра з ізоляцією було використано програму Wolfram Mathematica 10.0. Розрахунки проводили для різних значень параметрів структури [9, 42, 73]. Нижче наводимо результати обчислень для зовнішнього діаметру металевого циліндра (трубопроводу) $2a_i=1020$ mm; для трубопроводів з меншим діаметром (при однакових інших параметрах задачі) ємність буде меншою. Відносна діелектрична проникність ізоляції і зовнішнього середовища була прийнята відповідно $\varepsilon_i=3,4$ та $\varepsilon_e=15$. Для відносної магнітної проникності ізоляції і зовнішнього середовища були взяті значення $\mu_i = \mu_e=1$.

Вплив провідності ізоляції на розподіл компонент електричного поля металевого циліндра з ізоляцією показано на рис. 2.4-2.9. Розрахунки проводили для товщини ізоляції d=10 mm, частоти поля f=100 Hz, та провідності зовнішнього середовища $\sigma_e=0,05$ Om⁻¹m⁻¹. Розподіл компонент поля у зовнішній області досліджували на відстані $100a_e$. Коефіцієнт поширення (заникання поля) приймали $\gamma=0,001$ Nep/m, а струм вздовж (на поверхні) циліндра – $j_z=1$ A.



Рис. 2.4. Залежність радіальної компоненти напруженості електричного поля E_r в ізоляції від відстані *r* для різних провідностей ізоляції σ_i [Om⁻¹m⁻¹]



Рис. 2.5. Залежність *E_r* у зовнішній області від відстані *r*

Як видно з рис. 2.4-2.5, радіальна компонента електромагнітного поля ПТ залежить від стану захисного покриття і в зовнішній області спадає на два порядки на відстані 100*a_i*.



Рис. 2.6. Залежність модуля E_z в області ізоляції від відстані r для різних провідностей ізоляції σ_i [Om⁻¹m⁻¹]



Рис. 2.7. Залежність модуля E_z у зовнішній області від відстані r

Як видно з рис. 2.6-2.7 в області ізоляції поздовжня компонента електричного поля ПТ на три порядки менша від радіальної складової, що характерно для квазі-ТЕМ хвилі [9]. У зовнішній області поздовжня складова спадає на порядок на відстані 100*a_i* і за величиною стає сумірною радіальній складовій. Це свідчить про характер розподілу поля електромагнітної хвилі на великій відстані від ПТ подібно до поля хвиль Зоммерфельда чи Губо-Хармса [82, 83].

Зіставляючи результати обчислень поля на границі розділу середовищ $r=a_e$, отримуємо $|E_{zi}| = |E_{ze}| = 8.5 \cdot 10^{-4} B/m$, що підтверджує виконання умови неперервності поля і свідчить про коректність розрахунків.



Рис. 2.8. Залежність магнітного поля H_{φ} в області ізоляції від відстані r для різних провідностей ізоляції σ_i [Om⁻¹m⁻¹]



Рис. 2.9. Залежність H_{φ} у зовнішній області від відстані r для різних провідностей ізоляції σ_i [Om⁻¹m⁻¹]

Як видно з рис. 2.8-2.9 азимутальна компонента магнітного поля спадає на три порядки на відстані $100a_i$. На границі розділу середовищ отримуємо $|H_{\varphi i}| = |H_{\varphi e}| = 0,306 \ A \cdot m$ отже і тут виконується умова неперервності поля. З розрахунків маємо на поверхні циліндра значення $|H_{\varphi i}(a_i)| = 0,312 \ A \cdot m$; підставивши це значення у формулу (2.35), отримаємо $j_z=0.9998$ А, що вказує на достатньо точне виконання закону повного струму і свідчить про коректність розрахунків.

Вплив провідності середовища на розподіл компонент електромагнітного поля металевого циліндра з ізоляцією показано на рис. 2.10-2.14. Наводимо результати розрахунків для товщини ізоляції d=10 mm, частоти поля f=100 Hz, та провідності ізоляції $\sigma_i=0,001$ Om⁻¹m⁻¹. Розподіл компонент поля у зовнішній області досліджували на відстані $100a_e$. Коефіцієнт поширення приймали рівним $\gamma=0,001$ м⁻¹ а струм, що протікає по поверхні циліндра, $j_z=1$ А.



Рис. 2.10. Залежність модуля E_r в області ізоляції від відстані r для різних провідностей середовища σ_e [Om⁻¹m⁻¹]



Рис. 2.11. Залежність модуля E_r в зовнішній області від відстані r для різних провідностей середовища σ_e [Om⁻¹m⁻¹]

Як видно з рис. 2.10-2.11, радіальна компонента електричного поля ПТ в області ізоляції практично не залежить від провідності середовища а в зовнішній області спадає на два порядки на відстані $100a_i$ і зростає зі зменшенням провідності середовища.



Рис. 2.12. Залежність модуля E_z в зовнішній області від відстані r для різних провідностей середовища σ_e [Om⁻¹m⁻¹]

Як видно з рис. 2.12, в зовнішній області поздовжня складова зростає з ростом провідності середовища та стає сумірна по величині радіальній складовій на відстані 100*a_i*, що також вказує на характер подібний до поля хвиль Зомерфельда чи Губо-Хармса [82, 83].



Рис. 2.13. Залежність магнітного поля H_{φ} в області ізоляції від відстані r для різних провідностей середовища σ_e [Om⁻¹m⁻¹]



Рис. 2.14. Залежність магнітного поля H_{φ} у зовнішній області від відстані r для різних провідностей середовища σ_e [Om⁻¹m⁻¹]

Як видно з рис. 2.13-2.14 азимутальна компонента магнітного поля практично не залежать від провідності середовища і спадає на три порядки на відстані $100a_i$ у зовнішній області. На границі розділу середовищ також виконуються умова неперервності та закон повного струму, що свідчить про коректність розрахунків.

Вплив частоти поля на розподіл компонент електромагнітного поля металевого циліндра з ізоляцією показано на рис. 2.15-2.19. Розрахунки проводили для товщини ізоляції d=10 mm, провідності середовища $\sigma_e=0,01$ Om⁻¹m⁻¹ та провідності ізоляції $\sigma_i=0,001$ Om⁻¹m⁻¹. Розподіл компонент поля у зовнішній області досліджували на відстані $100a_e$. Коефіцієнт поширення приймали рівним 0,001 m⁻¹ а струм на поверхні циліндра – $j_z=1$ А.



Рис. 2.15. Залежність електричного поля *E_r* в області ізоляції від відстані *r* для різних частот поля *f* [Hz]



Рис. 2.16. Залежність радіальної компоненти електричного поля *E_r* у зовнішній області від відстані *r* для різних частот поля *f* [Hz]

Як видно з рис. 2.15-2.16, радіальна компонента електричного поля ПТ в області ізоляції майже не залежить від частоти поля і слабо спадає з відстанню, а в зовнішній області спадає на два порядки на відстані 100*a_i* і з ростом частоти на відстані 40*a_i* проявляється залежність поля від частоти.



Рис. 2.17. Залежність поздовжньої компоненти електричного поля *E*_z в зовнішній області від відстані *r* для різних частот поля *f* [Hz]

Як видно з рис. 2.17, поздовжня компонента електричного поля ПТ зі збільшенням частоти зростає на малих віддалях від циліндра і різкіше спадає зі збільшенням відділі. Це вказує на «притискання» поля до циліндра зі збільшенням частоти. При високих частотах поздовжня компонента стає сумірною по величині радіальній компоненті. На границі розділу середовищ також маємо рівність $|E_{zi}| = |E_{ze}|$ для всіх трьох значень частоти поля.



Рис. 2.18. Залежність модуля H_{φ} в області ізоляції від відстані r для різних частот поля f [Hz]



Рис. 2.19. Залежність модуля H_{φ} в зовнішній області від відстані r для різних частот поля f [Hz]

Як видно з рис. 2.18-2.19 азимутальна компонента магнітного поля не залежать від частоти поля в області ізоляції та спадає з відстанню. У зовнішній області з ростом частоти на відстані $40a_i$ проявляється її залежність від частоти поля. На границі розділу середовищ також виконуються умова неперервності та закон повного струму, що свідчить про коректність розрахунків.

2.3 Вплив електрофізичних параметрів середовища на ємність металевого циліндра з ізоляцією

Електрична ємність елементів циліндричних структур необхідна для визначення параметрів заступних схем з метою досліджень характеристик поширення електромагнітного поля для обґрунтування методів контролю та діагностування стану цих структур. В теорії направляючих систем, екранування, обстежень підземних трубопроводів [9, 42, 73, 89, 90] часто використовують формулу ємності коаксіальної лінії ідеальної конструкції, застосування якої не завжди правомірне.

Методи і формули розрахунку електричної ємності провідників різної форми в однорідному середовищі та поблизу границі середовищ викладені у праці [91]. Використовують середні потенціали і правила дзеркального відображення зарядів від плоскої границі. Викладені там результати, в основному, ґрунтуються на методах розрахунків електростатичного поля системи заряджених тіл. Частотні залежності там не розглядали.

Потреба досліджень залежності ємності поверхні металу з ізоляційним шаром в електропровідному середовищі від частоти ЕМ поля виникла у зв'язку з потребою обґрунтування нового методу визначення поляризаційного потенціалу [58, 68, 75, 92, 93] за вимірами постійних і змінних електричних напруг з вилученням омічного складника та вибору характеристик апаратури для контролю корозії металу в середовищі.

Для цього використовуємо описаний вище розв'язок крайової задачі електродинаміки для металевого циліндра з ізоляційним покривом в електропровідному середовищі. Маємо формули компонент поля основної квазі-ТЕМ хвилі. Використовуючи теорему Гауса, формулу енергії електриктричного поля та відомі співвідношення отримаємо математичні вирази для ефективної ємності. Наведемо результати розрахунків залежності ємності від частоти поля, електропровідності середовища та провідності ізоляційного шару [85, 95].

Використовуємо наведені в попередньому підрозділі вирази (2.31) та (2.33) для радіальної складової електричного поля в області ізоляції та в зовнішній області. За теоремою Гауса електричний заряд на поверхні металу пов'язаний з електричним полем [84, 85] в ізоляції:

$$Q = \varepsilon_i \oint_{S} \vec{E} d\vec{S} .$$
 (2.43)

Вираз для заряду одиниці довжини трубопроводу запишеться у наступному вигляді

$$Q = 2\pi a_e \varepsilon_i \int E_{r_i} dz = 2\pi a_e \varepsilon_i i \gamma v_i (A_0 J_1(v_i a_e) + B_0 N_1(v_i a_e)).$$
(2.44)

Енергія електричного поля [81, 82] в структурі у циліндричній системі координат

$$W_{e} = \int_{V} \frac{\varepsilon_{a} |E_{r}|^{2}}{2} dV = \frac{\varepsilon_{a}}{2} \int_{0}^{2\pi} \int_{z_{1}}^{z_{2}} \int_{a_{i}}^{\infty} |E_{r}|^{2} r dr d\varphi dz .$$
(2.45)

Враховуючи, що завдяки симетрії задачі $E_r(\varphi) = const$ і беручи до уваги, що в діапазоні низьких частот довжина квазі-ТЕМ хвилі ПТ становить сотні кілометрів [42, 73], тобто набагато більша поперечних розмірів структури, можна вважати $E_r(z) = const$ на одиницю довжини циліндра, отримуємо

$$W_e = \pi \varepsilon_i \int_{a_i}^{a_e} \left| E_{ri} \right|^2 r dr + \pi \varepsilon_e \int_{a_e}^{\infty} \left| E_{re} \right|^2 r dr \,. \tag{2.46}$$

Після підстановки виразів (12) і (15) отримуємо

$$W_{e} = \pi \varepsilon_{i} \int_{a_{i}}^{a_{e}} |i\gamma(A_{0}J_{1}(v_{i}r) + B_{0}N_{1}(v_{i}r))|^{2} r dr + \pi \varepsilon_{e} \int_{a_{e}}^{\infty} |i\gamma D_{0}H_{1}^{(2)}(v_{e}r)|^{2} r dr.$$
(2.47)

Використовуючи формулу для енергії електричного поля в конденсаторі $W_e = \frac{1}{2}C_{ek}|U|^2$ та відому формулу для ємності конденсатора $C_{ek} = |Q|/|U|$, отримуємо

$$C_{ek} = \frac{|Q|^2}{2W_e},$$
 (2.48)

де заряд описується формулою (2.44), а енергію обчислюємо за формулою (2.47).

Для розрахунку ємності металевого циліндра з ізоляцією, як і для наведених вище розрахунків компонент поля, використано комп'ютерну програму Wolfram Mathematica 10.0. Для розрахунків приймали зовнішній діаметр металевого циліндра $2a_i=1020$ mm, а товщина ізоляції 10 мм, тому $a_i=0,51$ m і $a_e=0,52$ m. Відносна діелектрична проникність ізоляції і зовнішнього середовища була прийнята відповідно $\varepsilon_i=3,4$ та $\varepsilon_e=15$. Для відносної магнітної проникності ізоляції і зовнішнього середовища були взяті значення $\mu_i=1$ і $\mu_e=1$ відповідно. Коефіцієнт поширення приймали $\gamma=0,001$ m⁻¹, а струм на поверхні циліндра $-j_z=1$ A.

Розраховано залежності еквівалентної ємності від частоти поля, від провідності середовища та від провідності ізоляції [85]. Результати розрахунків показані на рис. 2.20-2.25. Ємність одиниці довжини коаксіального кабелю, розрахована за формулою $C = \varepsilon 2\pi / \ln \frac{a_e}{a_i}$, дорівнює 1,617·10⁻⁸ F/m.

Залежність ємності металевого циліндра з ізоляцією від частоти поля для різних провідностей середовища та ізоляції показана на рис. 2.20-2.21.



Рис. 2.20. Залежність еквівалентної ємності C від частоти ω при σ_e =0,01 Om⁻¹m⁻¹, для різних провідностей ізоляції; C_{kk} – ємність коаксіальної лінії



Рис. 2.21. Залежність еквівалентної ємності C від частоти ω при σ_i =0,0001 Om⁻¹m⁻¹ для різних провідностей середовища; C_{kk} – ємність коаксіальної лінії

Як видно з наведених графіків, зі збільшенням частоти поля еквівалентна ємність металевого циліндра з ізоляцією до 100 Нг практично не залежить від частоти, а на вищих частотах починає плавно зростати.

Залежність ємності металевого циліндра з ізоляцією від провідності ізоляції для різних провідностей середовища та частоти поля показана на рис. 2.22-2.23.



Рис. 2.22. Залежність еквівалентної ємності C від провідності ізоляції σ_i , при σ_e =0,01 Om⁻¹m⁻¹ для різних частот поля; C_{kk} – ємність коаксіальної лінії



Рис. 2.23. Залежність еквівалентної ємності *C* від *σ_i* на частоті *f*=100 Hz для різних провідностей середовища; *C_{kk}* – ємність коаксіальної лінії

Як видно з наведених графіків еквівалентна ємність зі збільшенням частоти зростає у всьому діапазоні провідності ізоляції. Для ґрунтів з провідністю $\sigma_e = 0,001 \text{ Om}^{-1}\text{m}^{-1}$ використання формули коаксіальної лінії стає некоректним уже при провідності ізоляції $\sigma_i = 0,00001 \text{ Om}^{-1}\text{m}^{-1}$, а для ґрунтів з провідністю $\sigma_e = 0,1 \text{ Om}^{-1}\text{m}^{-1}$ – при провідності ізоляції $\sigma_i = 0,0001 \text{ Om}^{-1}\text{m}^{-1}$.

Залежність ємності металевого циліндра з ізоляцією від провідності середовища для різних провідностей ізоляції та частоти поля показана на рис. 2.24-2.25.



Рис. 2.24. Залежність еквівалентної ємності C від провідності середовища σ_e при f=100 Hz для різних провідностей ізоляції; C_{kk} – ємність коаксіальної лінії



Рис. 2.25. Залежність еквівалентної ємності C від провідності середовища σ_e при $\sigma_i=0,0001 \text{ Om}^{-1}\text{m}^{-1}$ для різних частот поля; C_{kk} – ємність коаксіальної лінії

Як видно з наведених графіків еквівалентна ємність металевого циліндра з ростом частоти та провідності середовища зростає, наближаючись до ємності коаксіальної лінії.

Як видно з результатів розрахунків, є діапазони значень параметрів (малі провідності середовища та великі провідності ізоляції), для яких ефективна ємність при низьких частотах поля значно відрізняється від результату обчислення ємності за формулою коаксіального кабелю ідеальної конструкції.

2.4 Електрофізичні параметри міжфазного шару

На поверхні металу (внаслідок виходу електронів за межі утворених позитивними іонами граток) утворюється подвійний електричний шар (ПЕШ) зі стрибком потенціалу $\Delta \Psi$. Вивченню цього важливого явища і його залежностей від характеристик металу і середовища (параметрів міжфазного шару) було присвячено багато досліджень, запропоновано різні моделі ПЕШ [15, 18].

На межі розділу метал-середовище протікають процеси переносу зарядів, адсорбції іонів, орієнтованої адсорбції дипольних молекул. При цьому поверхня
металу отримує електричний заряд одного знаку, а прилеглий до металу шар середовища отримує рівний за абсолютною величиною заряд протилежного знаку; виникає ПЕШ. Систему метал – електроліт з подвійним шаром на границі розділу фаз називають електродом [3-6].

Величину міжфазного стрибка потенціалу не можна безпосередньо виміряти, бо у кожному електрохімічному колі з ним сумуються інші невідомі стрибки потенціалу. Але можна міряти різницю потенціалів U (напругу) між робочим (піддослідним) електродом і електродом порівняння (ЕП), які контактують через іонний провідник (п. 1.3). Цю різницю потенціалів U називають електродним потенціалом робочого електрода відносно даного ЕП (табл. 1.3). Зазвичай використовують скорочений термін – електродний потенціал або ще коротше – потенціал [3-9].

Для задачі контролю поляризаційного потенціалу – стрибка потенціалу в ПЕШ – згідно з феноменологічними схемами (п. 2.1, рис. 2.1 і 2.2) важливими параметрами міжфазного шару є поляризаційна провідність (чи поляризаційний опір) та поляризаційна ємність.

У даному підрозділі розглянемо ці електрофізичні параметри міжфазного шару та оцінимо значення ємності поверхневого і міжфазних шарів (ємності ПЕШ) для межі розділу метал – середовище.

З позицій термодинаміки електрохімічних систем можливість корозії металу в розчині електроліту визначається знаком зміни його ізобарно-ізотермічного потенціалу (енергії Гіббса) або співвідношенням рівноважного потенціалу металу і оксидно-відновного потенціалу середовища. Електрорушійна сила рівноважної електрохімічної системи [15, 18] є функцією стандартної е. р. с. E_0 і активностей a_i реагуючих речовин A, B,... та продуктів реакції L, M,...; її описують рівнянням Нернста

$$E = E_0 - \frac{RT}{nF} \cdot \ln \frac{a_A a_B \dots}{a_L a_M \dots}.$$
(2.49)

Вирази електрохімічних потенціалів мають подібний вигляд [15]. Якщо метал отримав потенціал, рівний його рівноважному потенціалу, то корозія не проходить, а досягнутий потенціал називають захисним.

Встановлений у часі необоротний електродний потенціал (без поляризації зовнішнім струмом) називають стаціонарним, безструмовим або потенціалом корозії [96]. Він відповідає рівності сум швидкостей анодних і катодних процесів. Тут відбувається електрохімічне розчинення (корозія) металу. Густина струму розчинення металу при потенціалі корозії дорівнює швидкості корозії; її називають густиною струму корозії *і*сог.

Під час проходження струму через електрод відбувається поляризація. Потенціал електрода зміщується від рівноважного на деяку величину ΔE , що залежить від густини струму.

Електродні процеси експериментально досліджують потенціостатичним методом [15, 97]. Використовуючи імпульсну поляризацію [98-100] зі змінами полярності і параметрів (тривалості чи амплітуди) імпульсів, простежують кінетику парціальних електродних реакцій, що протікають на поверхні металу [98]. Вимірюваннями імпедансу (повного опору границі електрод-електроліт у змінному струмі) вивчають кінетику електродних процесів та характеристики ізолюючих покривів [101, 102]. Застосування спеціального моста змінного струму дає змогу визначати частотну залежність імпедансу в діапазоні від 20 Hz до 200 кГц за невеликої амплітуди змінної складової потенціалу (≤1÷5 mV), коли для багатьох електрохімічних параметрів елементи еквівалентних електричних схем можна вважати постійними (забезпечуються умови лінійності електрохімічної системи). Для опису електричних кіл змінного струму використовують відомий метод комплексних амплітуд [84, 101].

Для досліджень процесу дифузії на поверхні металу використовують дифузійний імпеданс Варбурга [101]:

$$Z_W = (1-i)W_F / \sqrt{\omega} , \qquad (2.50)$$

де $W_F = RT / (nF)^2 c_0 \sqrt{2D}$ – постійна Варбурга; c_0 – концентрація активної речовини; D – коефіцієнт дифузії. Вираз (1.8) відповідає послідовному з'єднанню активного опору і ємності (рис. 2.26), які залежать від частоти: $R_W = W_F / \sqrt{\omega}$, $C_W = 1/W_F \sqrt{\omega}$. Описувати дифузію імпедансом Варбурга можна лише за малих амплітуд гармонічних коливань потенціалу (<1 mV) [101].

Врахування ємності подвійного електричного шару з його імпедансом $Z_D = 1/i\omega C_D$ і фарадеївського імпедансу R_F (опору переносу заряду), приводить до еквівалентної електричної схеми [101, 103] з паралельними їх з'єднаннями (рис. 2.26б). Опір електроліту R_e включається послідовно з електродним імпедансом.



Рис. 2.26. Еквівалентні електричні схеми імпедансу Варбурга (*a*) та електрохімічної системи без адсорбції (*б*) для змінного струму

Узагальнене електрохімічне коло змінного струму зображають (рис. 2.27) імпедансом Z_R (що відображає швидкість процесів дифузії, адсорбції і електрохімічних реакцій); ємністю подвійного шару C_D (яку вважають незалежною від частоти) та опором електроліту R_e .



Рис. 2.27. Узагальнене електрохімічне коло змінного струму [101]

Це коло є важливою для нашої задачі частиною зображеної на рис. 2.1 і 2.2 феноменологічної електричної схеми ділянки підземного трубопроводу [94] (де для зручності замість опорів вказані відповідні провідності).

Корозійні процеси під ізоляційними покривами відносять до електрохімічних [104]. У дослідженнях покривів ємнісно-омічним методом з допомогою моста змінного струму електрод подають конденсатором з втратами. За наявності наскрізної провідності присутні електрична і електрохімічна ємності. У випадку пористого покриття (наскрізних дефектів ізоляції) в еквівалентну схему додатково входить опір електроліту в порах. Експериментальні дослідження різних лакофарбових покривів [102] з товщинами 20 µm, 80 µm показали що їх опори були $10^2 \div 10^9$ Om·cm², а ємності 0,1 ÷ 100 µF/cm².

За аналізом годографів частотної залежності імпедансу уточнюють еквівалентну схему; визначають опір покриття R_i , характеристичну ємність C_i , поляризаційний опір R_p , ємність подвійного шару C_D , постійну Варбурга W_F .

Значення поляризаційного опору використовують [105-107] для розрахунку струму (швидкості) корозії:

$$i_c = \frac{RT}{nF} \frac{1}{R_p}.$$
(2.51)

Стрибок потенціалу в міжфазному шарі пов'язаний з роботою виходу електрона з металу. Для визначення енергетичних характеристик міжфазних шарів з урахуванням спричинених перерозподілом електронів внутрішніх механічних напружень, за співвідношенями термодинаміки нерівноважних процесів, механіки деформівного твердого тіла та фізики поверхні розроблено математичну модель міжфазного шару [76, 77, 108-114].

Розглянемо вихідні положення цієї моделі [76, 77] та використаємо енергетичний підхід [110, 111], в основі якого оцінювання характеристик подвійного електричного шару (ПЕШ) за заданими значеннями поверхневих натягів та енергій. За електричною складовою поверхневої енергії W_E визначаємо ємність подвійного електричного шару на межі розділу середовищ. Величина W_E залежить від перерозподілу електронів провідності. Розраховують W_E міжфазного

шару за методом малого параметр [114] у три етапи. На першому етапі розглядають поверхню металу в неактивному газовому середовищі з відповідними параметрами. На другому – контакт двох металів з урахуванням міжфазного шару. На третьому – контакт металу з розчином електроліту.

Для металу, що знаходиться в неактивному (інертному) газовому середовищі співвідношення для поверхневого натягу σ_h , поверхневої енергії (ПЕ) W_s , умова рівноваги поверхневого шару та умова для визначення ефективної товщини h поверхневого шару такі [114]:

$$\int_{0}^{h} \sigma_{y} dx = \sigma_{h}, \quad \sigma_{y} = \sigma_{z}, \quad (2.52)$$

$$W_E + \xi W_D = W_S, \qquad (2.53)$$

$$\frac{\partial W_s}{\partial k} = \frac{\partial (W_E + \xi W_D)}{\partial k} = 0, \quad k = \sqrt{\frac{\rho C_{\varphi}}{\varepsilon_0}}, \quad (2.54)$$

$$\sigma_y + p = 0,$$
для $x = h.$ (2.55)

Тут $W_E = \int_0^h w_E dx$ – електрична складова ПЕ; $W_D = \int_0^h w_D dx$ – механічна; $w_E = \frac{\varepsilon_0}{2} \left(\frac{\partial \Psi}{\partial x}\right)^2$ і $w_D = \frac{\sigma_x (\sigma_x - 4v\sigma_y)}{2E} + \frac{(1-v)\sigma_y^2}{E}$ – їх густини; σ_x , σ_y – компоненти тензора механічних напружень; x, y – декартові координати, x перпендикулярна до межі середовищ; $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m – електрична стала; $v = \frac{3K - 2G}{2(3K + G)}$; $E = G \frac{3K + 4G}{3K + G}$; G, E, K – модулі зсуву, Юнга, всебічного стиску відповідно; v – коефіцієнт Пуассона; k –

модулі зсуву, Юнга, всебічного стиску відповідно; ν – коефіцієнт Пуассона; k – варіаційний параметр (1/k – відстань, на якій модифікований хімічний потенціал електронів провідності (МХПЕП) Φ зменшується в e разів (e – основа натуральних логарифмів)); ρ – питома густина металу; p=100 kPa – атмосферний тиск; C_{φ} – питома «електроємність матеріалу приповерхневого шару»; Ψ – скалярний потенціал електричного поля; ξ – безрозмірний параметр, що характеризує внесок механічної складової у поверхневу енергію (визначають з розв'язку граничної задачі) [76, 110, 114]. Перший вираз в (2.52) за суттю є означенням поверхневого натягу σ_h ; (2.53) – подання поверхневої енергії W_s через електричну W_E і механічну W_D складові; (2.54) – умова рівноваги поверхневого шару; (2.55) – співвідношення для оцінювання ефективної товщини *h* поверхневого шару.

Граничними умовами для рівнянь (2.52) – (2.55) є:

$$\varphi = -\Phi_0; \qquad \sigma_x = -\frac{\varepsilon_0}{2} \cdot \left(\frac{\partial \Psi}{\partial x}\right)^2 \qquad \text{при } x = 0,$$
(2.56)

де $\varphi = \Phi - \Phi_0$ – відхилення МХПЕП Φ від його рівноважного значення Φ_0 в об'ємі тіла далеко від поверхні; $\psi = \Psi - \Psi_0$ – відхилення електричного потенціалу Ψ від його рівноважного значення Ψ_0 ; $\vec{E} = \nabla \Psi = grad \Psi$ – напруженість електричного поля. $\Psi + \Phi = \zeta$ є електрохімічним потенціалом електронів провідності. Умова $\varphi + \psi = const$ виконується в контактуючих тілах типу метал – середовище (газ (повітря), метал, електроліт) [4].

Зі співвідношень (2.52) – (2.56) визначають C_{φ} , ξ , h та електрострикційний коефіцієнт об'ємного розширення b, добуток якого з модифікованим хімічним потенціалом електронів провідності ($b \times \Phi_0$) є малим параметром задачі ($b \times \Phi_0 < 1$) [114]. Використовують їх також для визначення електричної складової поверхневої енергії W_E , ємності ПЕШ C, стрибка електричного потенціалу $\Delta \Psi$ у подвійному електричному шарі на поверхні металу, МХПЕП Φ . На основі методу малого параметра визначено зміни поверхневих і міжфазних натягів та енергій [108] від впливу середовища.

Для обчислення міжфазної енергії W_m та міжфазного натягу σ_m на межі контактуючих металів, їх подають у вигляді [108-114]

$$W_{m} = W_{mE} + \xi_{m} W_{mD}; \quad W_{mE} = \int_{-H}^{H} w_{E} dx; \quad W_{mD} = \int_{-H}^{H} w_{D} dx; \quad \sigma_{m} = \int_{-H}^{H} \sigma_{y} dx. \quad (2.57)$$

Тут ξ_m характеризує зміну міжфазної енергії зі зміною її механічної складової; 2*H* – ефективна товщина міжфазного шару.

Умову рівноваги міжфазного шару (2.58) та наближені умови на умовних межах приповерхневих шарів x = H і x = -H (7) запишемо так [110, 114]:

$$\partial W_m / \partial x = \partial (W_{mE} + \xi_m W_{mD}) / \partial x = 0, \qquad (2.58)$$

$$\sigma_{yl} + p = 0 \ (x = +H),$$

$$\sigma_{y2} + p = 0 \ (x = -H). \tag{2.59}$$

Умови на межі розділу двох металів (1 – 2) [104]:

$$\varphi_1 + \Phi_{01} = \varphi_2 + \Phi_{02},$$

 $j_1 = j_2, \ \sigma_{x1} = \sigma_{x2}, \ \sigma_{y1} = \sigma_{y2}.$
(2.60)

Тут *j*₁, *j*₂ – густини електричних струмів, перпендикулярних межі контактуючих середовищ.

Співвідношення (2.58)–(2.60) описують умови, які з урахуванням виразів для поверхневих і міжфазних натягів [110–114] дають можливість сформулювати систему рівнянь для знаходження енергетичних характеристик і ємності міжфазного шару.

Для обчислення енергетичних характеристик міжфазних шарів і ємності *С* ПЕШ використовуємо результати теоретичних і експериментальних досліджень для модуля Юнга *E*, коефіцієнта Пуассона *v*, поверхневих натягу σ_h та енергії W_s , питомої густини металу ρ , густини електронів провідності *n* в одиниці об'єму, роботи виходу електрона з металу A_V , енергії Фермі E_F , які наведені у працях [115-118] (табл. 2.1).

Метал	ho, kg/m ³	ν	E, GPa	$n \cdot 10^{-28}, 1/\text{m}^3$	σ_h , H/m	<i>Ws</i> , Дж/м ³	A_V , eB	E_F , eB
Fe	7874	0,29	211	16,98	2,913	2,680	4,50	11,16
Zn	7133	0,25	108	13,154	1,310	1,204	4,25	9,37
Al	2700	0,35	70	18,08	1,272	1,160	4,24	11,63

Таблиця 2.1 – Значення фізичних величин металів [115-118]

Результати виконаних за методом малого параметра [114] з використанням співвідношень (2.58)–(2.60) розрахунків електричної складової W_E поверхневої енергії W_S та ємності C поверхневих шарів металів у неактивному газовому

середовищі, подано у таблиці 2.2, де величина $\Delta \Psi$ – відповідає стрибку електричного потенціалу металу в межах ПЕШ.

Метал	Fe	Al	Zn
<i>W_E</i> , мДж/м ²	172	846	746
W_E/W_S , %	64,0	72,9	62,0
$C, \mathrm{mF/m^2}$	102	134	113
$\Delta \Psi, V$	5,81	3,55	3,63

Таблиця 2.2 Значення електричної складової W_E поверхневої енергії металів, відношення W_E/W_S та ємності *С* ПЕШ металів у неактивному газовому середовищі

Ємність ефективного поверхневого електричного конденсатора C на поверхні металлу в неактивному газовому середовищі пов'язана із значенням W_E за допомогою відомого співвідношення [84, 118], аналогічного (2.48):

$$W_E = C(\Delta \Psi)^2 / 2$$
. (2.61)

Результати розрахунків [108] енергетичних характеристик міжфазних шарів, міжфазної ємності C_m , внутрішньої контактної різниці потенціалів $\Delta \varphi_{\mathbf{Y}}$ та відносного внеску електричної складової W_{mE}/W_m у міжфазну енергію контактуючих металів, виконаних на другому етапі за методикою [114] з використанням співвідношень (2.52)–(2.60), подано у таблиці 2.3.

Cuamara	W_{ad} ,	W_m ,	$\Delta \varphi_{\mathbf{Y}},$	$\Delta \varphi_{\mathbf{D}},$	U	W_{mE} ,	$W_{mE}/W_m,$	C_m ,
Системи	Дж/м ²	Дж/м ²	V	V	ς_P	мДж/м ²	%	mF/m ²
Fe–Cr	4,898	1,133	0,297	2,999	10,1	1,63	0,144	36,9
Fe–Zn	3,363	0,521	0,166	2,177	13,1	0,741	0,142	53,6
Fe-Al	3,194	0,646	0,186	2,256	12,1	1,00	0,155	57,9

Таблиця 2.3 – Енергетичні характеристики міжфазних шарів

Ємність міжфазного ПЕШ (ефективного електричного конденсатора) для контактуючих середовищ C_m пов'язана із значенням W_{mE} за допомогою співвідношення, аналогічного (2.61):

$$W_{mE} = C_m \left(\Delta \varphi_Y\right)^2 / 2 \,. \tag{2.62}$$

Вплив зовнішнього середовища на ПЕШ металу з позиції енергетичного підходу розглядаємо у двох варіантах. У першому – на межі металу з іншим металом відбувається перетікання заряду (електронів) з одного металу в інший; відповідні результати визначення C_m для контакту двох металів подано в табл. 2.3. Для електрохімії важливий ПЕШ на межі розділу метал-електроліт (другий варіант). При зануренні металу в розчин електроліту, що містить іони, утворюється специфічний іонний ПЕШ додатково до ПЕШ, що існував на поверхні металу до занурення, і ПЕШ, що виникає в результаті орієнтації полярних молекул розчинника (наприклад, води) біля поверхні металу. У таблиці 2.4 подано електрофізичні характеристики металу (Fe) і електроліту (водного розчину кухонної солі) на межі з інертним газовим середовищем.

	<i>C</i> , %	С, моль/л	ΔΨ, Β	<i>C_S</i> , Кл/м ²	σ_h , N/m	γ , J/m ²
Fe	_	_	5,75	0,102	2,913	2,68
NaCl	2,84	0,5	0,610	0,241	0,071	0,071
NaCl	3,5	0,621	0,615	0,240	0,072	0,072
NaCl	4,20	0,75	0,621	0,239	0,073	0,073

Таблиця 2.4 – Характеристики середовищ на границі з інертним

Якщо метал (сталь) контактує з електролітом, зокрема, 3,5 % розчином NaCl, то частина енергії ПЕШ витрачається на поляризацію електроліту і адсорбцію. При цьому, з урахуванням даних табл. 2.4 міжфазну енергію W_m отримаємо в результаті розв'язування задачі для контактуючих середовищ метал – електроліт [113]: $W_m = 1,73 \text{ Дж/м}^2$. Цьому значенню міжфазної енергії відповідає її

газовим середовищем

електрична складова $W_{mE} = 1,07$ Дж/м². Тоді аналогічно (2.62) для міжфазної ємності отримуємо

$$W_{mE} = C_m (\Delta \Psi_m)^2 / 2;$$
 $C_m = 119,2 \text{ mF/m}^2;$ $\Delta \Psi_m = 4,23 \text{ V}.$ (2.63)

Це означає, що під впливом електроліту (3,5 % розчину NaCl) зміна ємності ПЕШ:

$$\delta C = (C_m - C)/C = (119 - 102)/102 \approx 0.17.$$
(2.64)

Тобто питома ємність *С* ПЕШ на межі залізо-електроліт більша від ємності ПЕШ заліза в інертному середовищі на 17 %.

Отримане розрахункове значення ємності ПЕШ сталі в електроліті добре узгоджується з наведеними в літературі експериментальними даними. Зокрема експериментальні значення ємності ПЕШ на поверхні металу в електроліті (вуглецева сталь у ґрунтовому електроліті) за даними [119] складають C_m =10÷30 mF/m². Для межі сталь-бітум розраховано [76] питому ємність C_D =38 mF/m². Для сталевих магістральних трубопроводів [73] значення ємності ПЕШ приймають в межах 250÷600 mF/m².

2.5 Обґрунтування методу ВПП

Фізичною основою методу визначення ПП за вимірами постійних і змінних електричних напруг є різна залежність від частоти поляризаційної та омічної складових, що обумовлено великою ємністю подвійного електричного шару C_p на поверхні металу (границі метал-середовище), яка шунтує поляризаційний опір поверхні металу для змінного струму, у результаті чого поляризаційний потенціал на змінному струмі не проявляється [58, 69, 78-81, 92-95]. При цьому, опір середовища (яке оточує споруду) та з'єднувальних проводів на низьких частотах має характер активного, не залежить від частоти і співпадає з їх опором на постійному струмі. Для малої (порівняно з довжиною електромагнітної хвилі) зони контролю реактивним опором середовища можна знехтувати. При низьких частотах струму можна також нехтувати ємнісною провідністю ізоляційного покриття і враховувати лише його активну провідність (опір).

Таким чином, на постійному струмі І маємо:

$$U_{mg} = U_p + U_m = I(R_p + R_m)$$
(2.65)

а на змінному струмі Ј низької частоти:

$$V_{mg} = V_m = JR_m \,. \tag{2.66}$$

Співвідношення значень амплітуди змінного J і сили постійного I струмів, що протікають між металом споруди і середовищем, можна визначати за відношенням вимірів відповідних спадів напруг на одному і тому ж допоміжному опорі r, включеному між спорудою (ПТ) і заземленням, зробленим з такого ж металу, що і споруда [58, 94]. Маємо:

$$\frac{J}{I} = \frac{J_r}{I_r} = \frac{V_r}{U_r}.$$
(2.67)

Названі напруги U_r і V_r у практиці обстежень вигідніше міряти між встановленими в середовищі (грунті) двома ідентичними електродами (електродом порівняння ЕП і допоміжним електродом ДЕ), які віднесені від споруди на різну відстань [121-123]. Тоді роль допоміжного опору відіграє середовище (грунт) між електродами, а вимірювані напруги позначаємо U_{GG} і V_{GG} .

Згідно виразів (2.65) і (2.66) можна записати:

$$\frac{U_m}{I} = \frac{V_{mg}}{J} \,. \tag{2.68}$$

На основі виразів (2.65), (2.67) і (2.68) отримуємо формулу для визначення поляризаційного потенціалу

$$U_{p} = U_{mg} - V_{mg} \cdot U_{gg} / V_{gg}.$$
(2.69)

Для обґрунтування правомірності застосування запропонованого методу визначення ПП за вимірами постійних і змінних електричних напруг необхідно з урахуванням параметрів об'єкта контролю (ОК) визначити діапазон частот, в якому ємнісна провідність ізоляції набагато менша її активної провідності а ємнісна провідність ПЕШ шунтує його активну поляризаційну провідність (набагато більша за неї). Крім того, доцільно перевірити метод в натурних умовах.

2.5.1 Визначення діапазону частот, в якому правомірне застосування методу ВПП

На основі наведених вище результатів аналізу даних науково-технічної літератури [1-6, 10, 42] в реальних умовах експлуатації сталевих ПТ чи подібних підземних металевих споруд значення поляризаційного опору знаходиться в межах $R_p = 10^2 \div 10^5 \ Om \ m^2$, а значення ємності ПЕШ – $C_p = 10^{-1} \div 10^{-3} \ F/m^2$. Підставляючи ці значення у нерівність (2.15), отримуємо чотири вирази для визначення нижньої границі діапазону робочих частот.

$$\omega_{M} \gg \frac{1}{C_{p}R_{p}} = \frac{1}{10^{2} \cdot 10^{-1}} = 10^{-1} [rad/s]$$

$$\omega_{M} \gg \frac{1}{10^{2} \cdot 10^{-3}} = 10 [rad/s]$$

$$\omega_{M} \gg \frac{1}{10^{5} \cdot 10^{-1}} = 10^{-4} [rad/s]$$

$$\omega_{M} \gg \frac{1}{10^{5} \cdot 10^{-3}} = 10^{-2} [rad/s]$$
(2.70)

Виходячи з отриманих значень можна встановити, що нижня границя діапазону робочих частот методу ВПП для підземних металевих конструкцій становить f=2 Hz. За інших умов у міжфазному шарі це значення частоти може дещо відрізнятися (залежно від конкретних значень R_p і C_p).

Значення опору ізоляції згідно даних наведених в літературі [10] становить $R_i = 10^1 \div 10^4 \ Om \ m^2$, для ємності ізоляційного покриву використаємо отримані з розрахунку ефективної ємності металевого циліндра з ізоляцією в електропровідному середовищі значення, які наведені в підрозділі 2.3 і становлять $C_i = 10^{-9} \div 10^{-11} \ F/m^2$.

Підставивши ці значення у нерівність (2.15), отримуємо вирази для визначення верхньої границі діапазону робочих частот.

$$\omega_{M} \ll \frac{1}{C_{i}R_{i}} = \frac{1}{10^{1} \cdot 10^{-9}} = 10^{8} [rad/s]$$
$$\omega_{M} \ll \frac{1}{10^{1} \cdot 10^{-11}} = 10^{10} [rad/s]$$

$$\omega_{M} << \frac{1}{10^{4} \cdot 10^{-9}} = 10^{5} [rad / s]$$

$$\omega_{M} << \frac{1}{10^{4} \cdot 10^{-11}} = 10^{7} [rad / s]$$
(2.71)

Виходячи з отриманих значень можна встановити, що верхня границя діапазону робочих частот методу ВПП для ПТ становить *f*=2000 Hz.

2.5.2 Експериментальна перевірка методу ВПП

Для перевірки роботоздатності запропонованого методу вимірювань потенціалів в натурних умовах були проведені натурні вимірювання на трасі підземних магістральних газопроводів Липники-Львів на ділянці УКЗ Солонка – Жирівка Бібрського ЛВУМГ Управління МГ "Львівтрансгаз" ДК "Укртрансгаз" за допомогою створених у ФМІ портативних приладів ВП-2 і ОРТ+В2 та двох мідносульфатних ЕП [92, 93].

Вимірювання проводили на підземному газопроводі Липники – Персенківка діаметром 500 мм з діючою установкою катодного захисту КСС 1200-24/48-У1 з вихідними параметрами катодного захисту: напруга за показом вольтметра КСС – 20 В, струм за показами амперметра КСС – 7 А.

Перед початком вимірювань до вольтметра портативного приладу OPT+B2 підключали вивід до металу трубопроводу (рис. 2.28). На поверхні ґрунту над трубопроводом розміщували мідносульфатний ЕП і міряли постійну U_{mg} і змінну V_{mg} напруги «труба-земля». Відключали вивід від металу підземного трубопроводу і підключали його до допоміжного електрода, розміщеного на поверхні ґрунту на відстані порядку 4…6 значень глибин залягання трубопроводу, міряли постійну U_{gg} і змінну V_{gg} напруги «земля-земля». Поляризаційний потенціал U_{g} обчислюємо за формулою (1.8).

Результати проведених вимірювань показані у таблиці 2.5 та на рисунках 2.29-2.30.



Рис. 2.28. Схема перевірки методу визначення поляризаційного потенціалу в натурних умовах^

1 – пункт вимірювання; 2 – вольтметр; 3 – перемикач;

ЕП – мідносульфатний електрод порівняння; ДЕ – допоміжний електрод

Таблиця 2.5 – Експериментальні вимірювання постійних і змінних електричних напруг та визначення поляризаційного потенціалу на трасі ПТ.

Пікет ПТ	U_{MG},\mathbf{B}	U_{GG},\mathbf{B}	$V_{\scriptscriptstyle MG},{ m B}$	V_{GG} , B	U_p , B
Між СКЗ Солонка і струмком. Доп. ЕП зліва	-1,14	-0,023	0,38	0,09	-1,04
Доп. ЕП справа	-1,13	-0,026	0,38	0,088	-1,02
ПТ за струмком. Доп. ЕП зліва	-1,13	-0,025	0,3	0,19	-1,09
Доп. ЕП справа	-1,13	-0,02	0,3	0,187	-1,1
75 м від струмка	-1,05	-0,1	0,25	0,13	-0,86
повторний вимір	-1,03	-0,09	0,25	0,13	-0,86



Рис. 2.29. Розподіл вздовж ПТ постійної U_{mg} та змінної V_{mg} електричних напруг "труба-земля" та поляризаційного потенціалу U_p



Рис. 2.30. Розподіл вздовж ПТ постійної U_{gg} та змінної V_{gg} напруг "земляземля" (поперечний градієнт)

Таким чином, отримані виміри, що добре узгоджуються з типовими результатами обстежень ПТ. Це підтвердило придатність запропонованого методу для контролю ПП в натурних умовах.

Висновки до розділу 2

1. На основі аналізу феноменологічної електричної схеми межі метал-ізоляціяелектропровідне середовище отримано співвідношення для частоти змінного струму, за якої не проявляється поляризаційний опір границі метал-середовище і не проявляється ємнісна складова провідності ізоляційного шару у порівнянні з омічною складовою провідності цього ж реального ізоляційного шару в умовах експлуатації.

2. На основі розв'язку крайової задачі електродинаміки для квазі-ТЕМ хвилі встановлено залежності ефективної ємності металевого циліндра з ізоляцією в електропровідному середовищі від електрофізичних параметрів структури і частоти поля, що дає змогу обґрунтовано вибирати частоту поля для визначення омічного складника потенціалу.

3. Встановлено діапазони значень параметрів, для яких ефективна ємність суттєво відрізняється від результату обчислення ємності за формулою коаксіального конденсатора ідеальної конструкції. Показано, що для розрахунків ємності металевої конструкції з ізоляційним покривом у слабопровідному середовищі за низьких частот не слід застосовувати формули, які ґрунтуються на рівняннях електростатичного поля зарядженого тіла, а слід використовувати розв'язки електродинамічної задачі з урахуванням залежностей розподілу поля від частоти.

4. З використанням наведених у науково-технічній літературі механічних і електричних параметрів металів розраховано енергетичні характеристики міжфазних шарів. Оцінено значення питомої ємності подвійного електричного шару на межі розділу заліза і середовища ($C_D = 40 \text{ м}\Phi/\text{m}^2$), яке добре узгоджується з відомими експериментальними даними.

5. Теоретично й експериментально обґрунтовано правомірність застосування методу визначення поляризаційного потенціалу (ВПП) для контролю ПКЗ підземних трубопроводів (ПТ). На основі зіставлення реальних значень складових перехідного опору ПТ встановлено, що застосування запропонованого методу (ВПП) за перехідного питомого опору ізоляційного покриву ПТ <10⁴ Ом·м² правомірне при використанні частот змінної напруги в достатньо широкому діапазоні 2…2000 Гц.

РОЗДІЛ З РОЗРОБЛЕННЯ ПРИЛАДУ ДЛЯ ВИМІРЮВАНЬ ПОСТІЙНИХ І ЗМІННИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ НАПРУГ ТА ПОЛЯРИЗАЦІЙНОГО ПОТЕНЦІАЛУ

3.1 Вимоги до апаратури ВПП

Розроблювана апаратура ВПП призначена для діагностичних обстежень, контролю електрохімічного захисту для запобігання пошкоджень і продовження безаварійної експлуатації підземних магістральних трубопроводів, трубопровідних мереж та інших металевих конструкцій в електропровідному середовищі.

Для діагностичних обстежень і контролю стану ПТ необхідна переносна малогабаритна апаратура для вимірювань поляризаційного потенціалу, виготовлена з використанням сучасної елементної бази. Для підвищення продуктивності обстежень і запобігання помилок запису результатів потрібна автоматична фіксація вимірів у польових умовах.

Розроблювана апаратура повинна забезпечувати вимірювання постійних і змінних електричних напруг та поляризаційного потенціалу підземних трубопроводів, та інших підземних металевих конструкцій з автоматичним записом вимірів у електронну пам'ять.

Згідно сучасної нормативно-технічної документації прилади для вимірювання потенціалів трубопроводів повинні мати: клас точності не більше ніж 2,5; вхідний опір не менше ніж 10 МОт [10, п. 7.4.20]. Крім цього для роботи в реальних умовах потрібно, щоб прилади мали мінімально можливі масу і габарити, були придатні для роботи у польових умовах. Важливими є також захищеність від завад, мале енергоспоживання, автономне живлення з часом роботи не менше робочого дня без дозарядки, достатній для роботи протягом дня об'єм пам'яті (біля тисячі вимірів), фіксація координат точок вимірювань та зручний інтерфейс для опрацювання масивів виміряних даних.

За діючими нормами контроль ПКЗ металевих ПТ проводять протягом року, а регулярні обстеження по всій довжині трубопроводів слід виконувати періодично не менше 1 разу протягом 5 років. Це обумовлює широку область застосування апаратури BΠΠ, яка буде використана установами "Укртрансгаз", "Укртранснафта", "Укргазвидобування" НАК "Нафтогаз України" i підприємствами неруйнівного контролю та діагностичних обстежень підземних трубопроводів і металоконструкцій. Враховуючи відсутність подібної апаратури, можна стверджувати що ВПП має добрі перспективи широкого застосування в Україні і за кордоном.

3.2 Макет апаратури для вимірювань потенціалів і змінних електричних напруг

Для вирішення поставленої задачі у попередньо розроблений портативний прилад для визначення розміщення та контролю протикорозійного захисту підземних трубопроводів [49, 162] (відомий під назвою ОРТ+В2), який складається з двох вхідних клем, з'єднаного з ними першого високоомного вихід якого з'єднано з входом підсилювача першого лільника. каналу вимірювання постійної напруги, першого роздільного конденсатора, з'єднаного з першою вхідною клемою, та послідовно з'єднаних з ним перших вхідного підсилювача змінної напруги, смугового фільтра і випрямляча першого каналу змінної аналого-цифрового вимірювання напруги, перетворювача (АЦП). цифрового індикатора і блоку живлення, скомпонованих у малогабаритному корпусі, додатково [153] введено третю вхідну клему, з'єднані з нею послідовно другий високоомний дільник і підсилювач другого каналу вимірювання постійної напруги, перший та другий детектори постійної напруги, входи яких з'єднані з виходами підсилювачів відповідних (першого та другого) каналів вимірювання постійних напруг а виходи з'єднані з третім і шостим входами АЦП, перший і другий детектори полярності, з'єднані відповідно з виходами першого і другого

підсилювачів постійної напруги та другим і п'ятим входами АЦП, другий роздільний конденсатор, з'єднаний з третьою вхідною клемою, та послідовно з'єднані з ним другі вхідний підсилювач змінної напруги, смуговий фільтр і випрямляч другого каналу вимірювання змінної напруги, виходи випрямлячів першого та другого каналів вимірювання змінної напруги з'єднані відповідно з першим і четвертим входами АЦП, з'єднаний з виходом і керуючими входами АЦП та з цифровим індикатором мікропроцесор і з'єднані з ним модуль позиціонування, пам'ять, клавіатура та інтерфейс для зв'язку з комп'ютером для документування і подальшого опрацювання вимірів. Структура пристрою для вимірювань потенціалів (ВПП) показана на рис. 3.1.



Рис. 3.1. Функціональна блок-схема пристрою ВПП для вимірювань постійних і змінних електричних напруг та поляризаційного потенціалу

На відміну від попередніх [49], запропонований пристрій [129, 153] (Додаток А) по суті є чотириканальним (містить у собі канали вимірювань постійної і змінної напруг, та додатково введені канали вимірювань других постійної і змінної напруг), забезпечує одночасне вимірювання двох постійних і двох змінних електричних напруг та обчислення за ними у мікропроцесорі поляризаційного потенціалу. Усі результати записуються в електрону пам'ять з можливістю виводу кожної виміряної величини на цифровий індикатор пристрою чи передачі результатів через інтерфейс

у персональний комп'ютер для документування та подальшого опрацювання. Пристрій складається з аналогової і цифрової частин.

3.2.1 Принципові схеми аналогової частини вимірювача електричних напруг

Аналогова частина пристрою складається з чотирьох каналів: двох – підсилення постійної електричної напруги, та двох – підсилення та фільтрації змінної напруги. Коефіцієнти підсилення розраховані для вимірювання потенціалів у межах від 10⁻³ до 10 V. Для міряння постійних напруг застосовано підсилювач з високим вхідним опором і малим зміщенням вихідної напруги та детектор полярності. Для міряння змінних напруг уведено попередні підсилювачі з високим вхідним опором і масштабні підсилювачі. Для виділення корисного сигналу від завад уведено смугові фільтри. Для випрямлення змінного сигналу введено випростовувач. З аналогових каналів сигнали подаються на входи АЦП.

Розроблена принципова електрична схема аналогової частини каналів підсилення змінної напруги [93, 122] пристрою ВПП показана на рис 3.2. Вхідні підсилювачі першого і другого каналів вимірювання змінних напруг з високим вхідним опором (>2 MOm) підсилюють змінні напруги з вхідних клем до рівня, необхідного для правильної роботи АЦП. Підсилені змінні напруги подаються відповідно на смугові фільтри для виділення вимірюваних сигналів на фоні завад, які настроюють на частоту змінної складової електричної напруги між об'єктом і середовищем. Випрямлячі виділяють амплітуди змінних напруг.

Розроблена принципова електрична схема аналогової частини каналів підсилення постійної напруги пристрою ВПП показана на рис. З.З. Високоомні дільники першого і другого каналів вимірювання постійних напруг забезпечують високий вхідний опір (>2 MOm) вимірювачів різниці потенціалів (постійної напруги) для зменшення падіння напруги на вхідних клемах приладу (чим зменшується похибка вимірювань). Перший і другий детектори постійної напруги дають можливість вимірювати напруги різної полярності (вхід АЦП розрахований на напругу одної полярності). Знак полярності вхідних напруг визначають детектори полярності. Підсилювачі постійної напруги підсилюють напруги з виходів високоомних дільників до рівня, необхідного для правильної роботи АЦП, що дає змогу підвищити чутливість вимірювань різниць потенціалів [93].



Рис. 3.2. Принципова електрична схема каналу підсилення та фільтрації змінної напруги



Рис. 3.3. Принципова електрична схема каналу підсилення постійної напруги

3.2.2 Макетування вузлів чотириканального пристрою ВПП

Усі чотири канали (вимірювань двох постійних і двох змінних напруг) разом з іншими елементами (перетворення сигналів, обчислень ПП та управління) пристрою монтуємо на друкованих платах, які розміщуємо в одному корпусі. Усі каскади виконуємо на мікропотужних операційних підсилювачах, що забезпечують мале енергоспоживання і стабільність роботи в польових умовах.

Підсилювачі, фільтри та випрямлячі пристрою виконуємо на основі операційних підсилювачів. Чотириканальний АЦП одночасно перетворює рівні аналогових квазіпостійних сигналів у цифрову форму, які разом з сигналами полярності подаються на вхід мікропроцесора. Мікропроцесор керує схемами вибірки-зберігання АЦП, проводить математичні операції розрахунку поляризаційного потенціалу, записує дані у пам'ять з одночасним формуванням номера виміру, виводить інформацію на рідкокристалічний цифровий індикатор (дисплей). Клавіатура змонтована з кнопок на передній панелі корпусу пристрою і забезпечує керування режимами роботи пристрою.

Блок живлення містить акумулятор і перетворювач однополярної напруги у двополярну для живлення операційних підсилювачів. Для живлення мікроконтролера та цифрової частини використовується стабілізатор +5 В. Живлення пристрою – від одного акумулятора напругою 6 В; передбачена зарядка його від мережі 220 В або автомобільного акумулятора 12 В [122].

3.2.3 Розроблення програми мікропроцесора пристрою ВПП

Цифрова частина пристрою виконана на мікроконтролері PIC16F877-20/P, який забезпечує роботу апаратури в двох режимах — запису і обробки даних та зчитування даних з пам'яті апаратури. У режимі запису мікроконтролер приймає аналогові сигнали з чотирьох аналогових каналів, переводить їх у цифрову форму. При цьому контролюється рівень сигналу для правильної роботи АЦП і за необхідності переключається діапазон підсилення аналогових каналів, вибираючи один з діапазонів залежно від рівня сигналу. Мікроконтролер автоматично проводить розрахунок поляризаційного потенціалу та омічного падіння напруги з виводом даних на цифровий індикатор та записом даних у пам'ять з присвоєнням виміру чергового номера. Запис останнього номера виміру дозволяє при виключенні та повторному включенні апаратури продовжити роботу і запис даних відразу після останнього виміру.

У режимі зчитування даних з пам'яті апаратури мікроконтролер по команді оператора почергово зчитує дані з енергонезалежної пам'яті і виводить їх на цифровий індикатор. Передбачена можливість перегляду даних вперед, назад, або вихід на перший вимір а також передати всі дані на персональний комп'ютер по інтерфейсу.

Мікропроцесор також контролює вибір режимів роботи, подачу відповідних напруг живлення для роботи апаратури, керує роботою перетворювача напруг, приймає команди з клавіатури керування апаратурою, контролює стан елементів живлення та попереджує про повний розряд елементів живлення, запобігаючи виходу їх з ладу [120-123].

Основні функції розробленої програми роботи пристрою ВПП такі:

1. Вибір режиму роботи "Вимір" (вимірювання і обробка даних із записом у пам'ять) – "Перегляд" (перегляд на індикаторі записаних у пам'яті даних).

2. Автоматичний вибір діапазону вимірювання у режимі "Вимір".

3. Дозвіл на вимірювання постійних і змінних електричних напруг при коректних даних.

4. Проведення вимірювань, перетворення аналогових сигналів у цифрову форму, та розрахунок поляризаційного потенціалу трубопроводу.

5. По команді оператора запис усіх даних в енергонезалежну пам'ять з присвоєнням виміру чергового номера.

6. Контроль стану пам'яті (заповнення, вихід на останній записаний номер при включенні, стирання хибного запису, вихід на початок пам'яті).

7. Вивід даних на рідкокристалевий цифровий індикатор (4 стрічки).

8. Комутація виводу даних на цифровий індикатор – постійна і змінна напруга між ЕП і ОК, та ЕП і ДЕ, поляризаційний потенціал, омічне падіння напруги в середовищі, черговий номер виміру, стан батареї.

9. У режимі "Перегляд" – вивід на індикатор та перегляд даних з пам'яті в довільному порядку.

10. Вивід записаних у пам'яті даних через інтерфейс у комп'ютер для подальшого документування.

11. Контроль стану живлення та вивід попередження при повному розряді.

12. Контроль роботи блоку живлення та перетворювача напруги.

Призначення виводів мікроконтролера вказані у таблиці 3.1. Розподіл масиву даних у стрічці пам'яті пристрою ВПП наведено у таблиці 3.2.

Вивід	Признач.	Напрям	Вивід	Признач.	Напрям
1	2	3	4	5	6
1	MCLR	+ 5 V	21	RD2	
2	RA0/AN0	Вхід постійної U1	22	RD3	
3	RA1/AN1	Вхід постійної U2	23	RC4/SDA	Пам'ять І ² С
4	RA2/AN2	Вхід змінної V1	24	RC5	Кнопка "Стерти все"
5	RA3/Uref+	Опорна напруга 2,5 V	25	RC6/TX	Вихід на RS-232
6	RA4	Полярність U1	26	RC7/RX	Полярність U2
7	RA5/AN4	Вхід змінної V2	27	RD4	
8	RE0/AN5	Вхід контролю	28	RD5	
		Uживл.			
9	RE1/AN6		29	RD6	
10	RE2/AN7		30	RD7	
11	Vdd	+ 5 V	31	Vss	Земля
12	Vss	Земля	32	Vdd	+ 5 V
13	Osc1	Кварц 20 МГц	33	RB0	RS
14	Osc2	Кварц 20 МГц	34	RB1	Enable
15	RC0	Переключ.запис- зчитув.	35	RB2	Data1
16	RC1	Кнопка "ЗАПИС"	36	RB3	Data 2
17	RC2	Кнопка "Скасувати"	37	RB4	Data 3
18	RC3/SCL	Пам'ять І ² С	38	RB5	Data 4
19	RD0		39	RB6	
20	RD1		40	RB7	

Таблиця 3.1 – Призначення виводів мікроконтролера пристрою ВПП

N⁰	Адрес	Variab		N⁰	Variab	Адрес	
1	2	3	4	5	6	7	8
1	0,0000	D1	Знак Ц1	17	D17	1 0000	Третя цифра V2
2	0 0001	D1 D2	Перша цифра U1	18	D18	1 0001	Четверта цифра V2
3	0 0010	D3	Друга цифра U1	19	D19	1 0010	Знак результат
4	0 0011	D4	Третя цифра U1	20	D20	1 0011	Перша цифра результату
5	0 0100	D5	Четверта цифра U1	21	D21	1 0100	Друга цифра рез.
6	0 0101	D6	Перша цифра V1	22	D22	1 0101	Третя цифра рез.
7	0 0110	D7	Друга цифра V1	23	D23	1 0110	Четверта цифра рез.
8	0 0111	D8	Третя цифра V1	24		1 0111	-
9	0 1000	D9	Четверта цифра V1	25		1 1000	
10	0 1001	D10	Знак U2	26		1 1001	
11	0 1010	D11	Перша цифра U2	27		1 1010	
12	0 1011	D12	Друга цифра U2	28		1 1011	
13	0 1100	D13	Третя цифра U2	29		1 1 1 1 0 0	
14	0 1101	D14	Четверта цифра U2	30		1 1101	
15	0 1110	D15	Перша цифра V2	31		1 1110	
16	0 1111	D16	Друга цифра V2	32		1 1 1 1 1 1	

Таблиця 3.2 – Розподіл даних у стрічці пам'яті ВПП

3.3 Апаратура для вимірювань електричних напруг і поляризаційного потенціалу ВПП

Розроблений макет вимірювача напруг з мікропроцесором для визначення поляризаційного потенціалу і показано на рис. 3.4.



Рис. 3.4. Діючий макет 4-канального вимірювача постійних і змінних електричних напруг з мікропроцесором для визначення поляризаційного потенціалу

На рисунку 3.5 показано загальний вигляд розробленого приладу ВПП. Подаємо короткий опис ВПП і порядок роботи під час його застосування.



Рис. 3.5. Вимірювач поляризаційного потенціалу ВПП

Приладу ВПП скомпонований у пластиковому корпусі з автономним живленням. На передній панелі розміщені: рідкокристалевий цифровий дисплей, вимикач живлення, перемикач режимів роботи «Запис-Зчитування», кнопки «Запис», «Скасування» хибного виміру, «Слідуючий» вимір і «Попередній» вимір, гнізда для підключення до об'єкта контролю та до двох електродів. У корпусі розміщені плати підсилювачів постійних напруг двох каналів, плати підсилювачів змінних напруг двох каналів, плата управління з мікроконтролером, блок живлення та акумуляторна батарея. Алгоритм роботи приладу, математичної обробки результатів вимірювань, протокол запису та зчитування з пам'яті і передачі даних в ПК програмно закладений у мікроконтролер (мікропроцесор). Забезпечено можливість змінювати програму, вносити необхідні корективи [120].

До контакту 1 підключаємо вивід до металу трубопроводу, до контакту 0 підключаємо мідносульфатний електрод порівняння, розміщений на поверхні ґрунту над трубопроводом, до контакту 2 підключаємо мідносульфатний електрод, розміщений на поверхні ґрунту на відстані порядку 2...6 значень глибин залягання трубопроводу.

Включення приладу здійснюється кнопкою "ВКЛ". Прилад живиться від акумуляторної батареї, ємності якої достатньо для 10 годин безперервної роботи. Для проведення вимірювань вибираємо режим "Вимір", а для перегляду записаних у пам'ять ВПП даних вибираємо режим "Перегляд". У режимі "Вимір" на дисплей постійно виводяться виміряні з двох входів значення постійної і змінної напруг. Вивід на дисплей виміряних значень, результату обробки, а також номеру активної комірки пам'яті вибирається послідовно кнопками "СЛІДУЮЧИЙ" або "ПОПЕРЕДНІЙ". Для запису всіх виміряних величин у пам'ять натискаємо кнопку "ЗАПИС", при цьому активною стає наступна комірка пам'яті.

Ємність енергонезалежної пам'яті становить 1000 вимірів (наборів вимірюваних величин з їх номерами). Для випадку проведення хибного вимірювання або некоректного запису забезпечено можливість стерти цей запис кнопкою "СКАСУВАТИ". При неправильному підключенні електродів, відсутності вимірюваних напруг, на дисплеї висвічується напис "ERROR" і запис у пам'ять блокується.

У режимі "Перегляд" є можливість переглядати усі записані в пам'ять дані. Вибираючи виміри послідовно кнопкою "ЗАПИС", а кнопками "СЛІДУЮЧИЙ" або "ПОПЕРЕДНІЙ", вибираються послідовно вивід постійної та змінної напруг для кожного каналу, результат визначення поляризаційного потенціалу та номер комірки пам'яті.

Вийти на початковий вимір можна, натиснувши одночасно кнопки "СЛІДУЮЧИЙ" та "ПОПЕРЕДНІЙ". При виводі останнього виміру кнопка "ЗАПИС" стає неактивною.

Для передачі вмісту пам'яті ВПП на персональний комп'ютер (ПК) вихід приладу підключаємо до порту RS-232 ПК. Управління передачею масиву вимірів здійснюється програмно з ПК [120, 122].

3.4 Вдосконалення апаратури для вимірювання постійних і змінних електричних напруг та поляризаційного потенціалу

Проведені лабораторні дослідження і натурні випробування приладу ВПП показали недостатню точність вимірювань потенціалів (похибка була більшою 2,5 %) та недостатній вхідний опір (2 MOm). Не було забезпечено автоматичну фіксацію координат точок вимірювань.

Для усунення цих недоліків удосконалено схеми і розроблено новий зразок апаратури ВПП-М.

При розробці апаратури ВПП-М був врахований досвід лабораторних та польових випробувань приладу ВПП. Проведено модернізацію електричної принципової схеми апаратури для підвищення точності, надійності та зменшення енергоспоживання апаратури. В аналогових каналах використано прецизійні резистори, нові операційні підсилювачі з кращими характеристиками. Використано більш потужний мікропроцесор з більшою програмною пам'яттю та

розширеною периферією. Проведено удосконалення програми мікропроцесора для покращення роботи апаратури, підвищення точності вимірювань та обробки результатів. Збільшено об'єм оперативної пам'яті для зберігання результатів вимірювань. Модернізовано блок живлення для зменшення енергоспоживання. Також був введений модуль GPS для визначення місцезнаходження апаратури при вимірюваннях. Модернізовано протокол передачі даних на ПК.

3.4.1 Розробка схем апаратури ВПП-М

Розроблена нових принципових електричних схем аналогової і цифрової частин апаратури ВПП-М [120, 138-143] зображена на рисунках 3.6 і 3.7. Загальна принципова електрична схема апаратури ВПП-М зображена на рисунку 3.8.



Рис. 3.6. Принципова електрична схема аналогової частини ВПП-М



Рис. 3.7. Принципова електрична схема цифрової частини ВПП-М



Рис. 3.8. Принципова електрична схема приладу ВПП-М

Загальна принципова електрична схема блоку живлення приладу ВПП-М зображена на рисунку 3.9.



Рис. 3.9. Принципова електрична схема блоку живлення приладу ВПП-М

3.4.2 Розробка конструкції та виготовлення апаратури ВПП-М

ВПП-М скомпонований у пластиковому корпусі з автономним живленням. На передній панелі розміщені: рідкокристалевий цифровий дисплей, кнопки управління, гнізда для підключення до об'єкта контролю та до двох електродів. У корпусі розміщені плати підсилювачів постійних напруг двох каналів, плати підсилювачів змінних напруг двох каналів, плата управління з мікроконтролером, блок живлення та акумуляторна батарея. Алгоритм роботи приладу, математичної обробки результатів вимірювань, протокол запису та зчитування з пам'яті і передачі даних в ПК програмно закладений у мікроконтролер (мікропроцесор). Забезпечено можливість змінювати програму, вносити необхідні корективи [122].

Усі чотири канали (вимірювань двох постійних і двох змінних напруг) разом з іншими елементами (перетворення сигналів, обчислень ПП та управління)

пристрою змонтовані в одному корпусі. Монтаж електричних схем виконано на друкованих платах. Уci каскади пристрою виконані на мікропотужних операційних підсилювачах, забезпечують енергоспоживання i ЩО мале стабільність роботи в польових умовах.

Для монтажу використовуємо малогабаритні мікросхеми, виконані по технології SMD з малим споживанням енергії. Також використані резистори з допуском по номіналу ± 1 % і конденсатори фільтрів з допуском ± 5 %.

Монтажна плата аналогової частини підсилювача постійної напруги апаратури ВПП-М показана на рис. 3.10а, а монтажна плата підсилювача змінної напруги на рис. 3.106 [122].



a

Рис. 3.10. Монтажна плата аналогової частини апаратури ВПП-М: *а* – підсилювача постійної напруги; *б* – підсилювача змінної напруги

Виготовлені плати апаратури ВПП-М показані на рис. 3.11-3.14.



Рис. 3.11. Плата мікроконтролера апаратури ВПП-М



Рис. 3.12. Плата каналів вимірювання змінної напруги апаратури ВПП-М



Рис. 3.13. Плата каналів вимірювання постійної напруги апаратури ВПП-М



Рис. 3.14. Плата живлення апаратури ВПП-М

Для підвищення оперативності вимірювання у приладі ВПП було використано модуль GPS ORG1315 принципова схема якого зображена на рис. 3.15.



Рис. 3.15. Принципова схема модуля GPS ORG1315

3.4.3 Елементи управління та алгоритм роботи апаратури ВПП-М

Загальний вигляд виготовленого зразка апаратури ВПП-М показаний на рис. 3.16. Панель управління з цифровим індикатором, вхідними гніздами, кнопками управління і регулювання показана на рис. 3.17 [154].



Рис. 3.16. Загальний вигляд апаратури ВПП-М для діагностичних обстежень і контролю протикорозійного захисту підземних трубопроводів



Рис. 3.17. Панель управління апаратури ВПП-М

Елементи управління розміщені на передній панелі вимірювального блоку ВПП-М наступним чином (Додаток А):

1 – гніздо для підключення до електроду порівняння;

2 – гніздо для підключення до допоміжного електроду;

3 – гніздо для підключення до металу підземного трубопроводу;

4 – кнопка "ВКЛ" для включення приладу;

5 – кнопка "ВИКЛ" для виключення приладу;

6-кнопка "ВИМІР ЗЧИТУВ" для переключення режиму роботи "вимірювання" або "зчитування";

7 – кнопка "ЗАПИС ПК" для запису даних вимірювання в пам'ять приладу в режимі "ВИМІР" та передачі даних на комп'ютер в режимі "ЗЧИТУВ";

8 – кнопка "ПОЧАТОК СТЕРТИ ПАМ'ЯТЬ" для переходу на перший записаний номер виміру в режимі "ЗЧИТУВ" та видалення всіх записаних даних в режимі "ВИМІР";

9 – кнопка "НАЗАД ВИДАЛИТИ ВИМІР" для переходу на попередній записаний номер виміру в режимі "ЗЧИТУВ" та видалення останнього записаного виміру в режимі "ВИМІР";

10 – кнопка "ВПЕРЕД GPS" для переходу на наступний записаний номер виміру в режимі "ЗЧИТУВ" та виведення на індикатор даних приймача GPS в режимі "ВИМІР";
11 – кнопка "КІНЕЦЬ" для переходу на останній записаний номер виміру;

12 - кнопка включення підсвітки індикатора;

Індикатори рідкокристалічного цифрового дисплею

13 – "S" постійна і змінна напруги між ЕП та допоміжним електродом;

14 – "М" постійна і змінна напруги між ЕП та металом трубопроводу;

15 – значення постійних напруг;

16 – значення змінних напруг;

17 - "Р" значення поляризаційного потенціалу;

18 – порядковий номер виміру;

19 - "R" значення омічного складника;

20 – наявність сигналу GPS ("V" – відсутній, "А" – активний);

21 – стан заряду акумулятора.

Включення приладу здійснюється кнопкою "ВКЛ". Прилад живиться від акумуляторної батареї, ємності якої достатньо для 10 годин безперервної роботи. Для проведення вимірювань вибираємо режим "ЗАПИС", а для перегляду записаних у пам'ять ВПП-М даних вибираємо режим "ЗЧИТУВ". У режимі "ЗАПИС" на дисплей постійно виводяться виміряні з двох входів значення постійної і змінної напруг. Вивід на дисплей виміряних значень, результату обробки, а також номеру активної комірки пам'яті вибирається послідовно кнопками "Вперед" або "Назад". Для запису всіх виміряних величин у пам'ять натискаємо кнопку "ЗАПИС", при цьому активною стає наступна комірка пам'яті.

Ємність енергонезалежної пам'яті становить 1000 вимірів (наборів вимірюваних величин з їх номерами). Для випадку проведення хибного вимірювання або некоректного запису забезпечено можливість стерти цей запис кнопкою "Видалити вимір". При неправильному підключенні електродів, відсутності вимірюваних напруг, на дисплеї висвічується напис "ERROR" і запис у пам'ять блокується [122].

Алгоритм роботи мікроконтролера апаратури ВПП-М зображений на рис. 3.18.



Рис. 3.18. Алгоритм роботи апаратури ВПП-М



Рис. 3.19. Алгоритм роботи вимірювача поляризаційного потенціалу ВПП-М в режимі вимірювання

Цифрова частина апаратури виконана на мікроконтролері PIC18F452, який забезпечує роботу апаратури в двох режимах – запису і обробки даних та зчитування даних з пам'яті апаратури. Мікроконтролер в режимі запису приймає аналоговий сигнал з трьох аналогових каналів, переводить їх у цифрову форму. При цьому контролюється рівень сигналу для правильної роботи АЦП і при необхідності переключається діапазон підсилення аналогових каналів, вибираючи один з діапазонів залежно від рівня сигналу [122].

Мікроконтролер автоматично проводить розрахунок поляризаційного потенціалу та омічного падіння напруги з виводом даних на цифровий індикатор та записом даних у пам'ять з присвоєнням виміру чергового номера. Одночасно проводиться прийом даних з модуля GPS, які також записуються в пам'ять та при потребі виводяться на цифровий індикатор. Запис останнього номера виміру дозволяє при виключенні та повторному включенні апаратури продовжити роботу і запис даних відразу після останнього виміру.

У режимі зчитування даних з пам'яті апаратури мікроконтролер по команді оператора почергово зчитує дані з енергонезалежної пам'яті і виводить їх на цифровий індикатор. Передбачена можливість перегляду даних вперед, назад, або вихід на перший вимір. Також у цьому режимі є можливість передати всі дані на персональний комп'ютер по інтерфейсу RS-232.

Мікроконтролер також контролює вибір режимів роботи, подачу відповідних напруг живлення для роботи апаратури, керує роботою перетворювача напруг, приймає команди з клавіатури керування апаратурою, контролює стан елементів живлення з індикацією на індикаторі та попереджує про повний розряд елементів живлення, запобігаючи виходу їх з ладу.

При недостатньому освітленні на панелі управління апаратури передбачена підсвітка дисплея та клавіатури.

Живлення апаратури здійснюється від одного акумулятора напругою 7,4 В. Передбачена можливість зарядки його від мережі 220 В або автомобільного акумулятора 12 В.

Основні функції програмного забезпечення такі [122]:

1. Вибір режиму роботи "Вимір" (проведення вимірювання, прийняття даних GPS, обробка даних із записом у пам'ять та виводом на рідкокристалевий індикатор) – "Перегляд" (режим перегляду записаних у пам'яті даних).

2. У режимі "Вимір" діапазон вимірювання вибирається автоматично.

3. Обробка даних приймача GPS (координати, висота, час).

4. Дозвіл на проведення вимірювання постійних і змінних електричних напруг при коректних даних.

5. Проведення вимірювань, перетворення аналогових сигналів у цифрову форму, та розрахунок поляризаційного потенціалу трубопроводу.

6. По команді оператора запис усіх даних в енергонезалежну пам'ять з присвоєнням виміру чергового номера.

7. Контроль стану пам'яті (заповнення, вихід на останній записаний номер при включенні, стирання хибного запису, вихід на початок пам'яті).

8. Вивід даних на рідкокристалевий цифровий індикатор (4 стрічки).

9. Комутація виводу даних на цифровий індикатор – постійна і змінна напруга між ЕП і ОК, та ЕП і ДЕ, поляризаційний потенціал, омічне падіння напруги в середовищі, координати GPS, час виміру, черговий номер виміру, стан батареї.

10. У режимі "Перегляд" – вивід на індикатор та перегляд даних з пам'яті в довільному порядку.

11. Вивід записаних у пам'яті даних на ПК через інтерфейс RS-232 для подальшого документування.

12. Контроль стану батареї живлення та вивід попередження при повному розряді.

13. Контроль роботи блока живлення та перетворювача напруги.

Технічні характеристики апаратури ВПП-М такі:

Діапазон вимірюваних напруг, В	–для постійних MG	0,01 10
	–для змінних MG	0,01 10
	–для постійних GG	0,001 1
	–для змінних GG	0,001 1
Робочі частоти, Гц		$100 \pm 0,5$
Послаблення завад промислової частоти, дБ, н	не менше	40
Споживана потужність, ВА, не більше		0,75
Кількість вимірів, фіксованих у пам'яті		1000
Живлення приладу від акумуляторів, В		$7,5\pm0,3~\mathrm{B}$
Час роботи від повного заряду акумулятора		12 год
Діапазон робочих температур, ° С		0+30

Габарити вимірювального блоку, мм	180*150*70
Маса вимірювального блоку (з акумуляторами), кг	1,2
В комплект приладу ВПП-М входять:	
– блок вимірювальний ВПП-М	1 шт
– проводи з'єднувальні	3 шт.
 паспорт, технічний опис та інструкція до експлуатації 	1 шт

3.5 Застосування системи глобального позиціонування в обстеженнях підземних трубопроводів

Під час обстежень ΠТ необхідно визначати відстані між точками вимірювань, «прив'язувати» їх до пікетів траси. Традиційні використання лінійок, і т.п. пристроїв ускладнює процедуру обстежень. рулеток, шляхомірів Використання модуля GPS суттєво спрощує процедуру обстежень ПТ, оскільки відпадає потреба розмітки траси, прив'язки до орієнтирів місцевості і т.п. Це пришвидшує процес вимірювань і полегшує опрацювання вимірів. Модуль GPS видає широту, довготу і висоту точки та час вимірювань. За отриманими географічними координатами обчислюємо відстані (інтервали) між вимірами, можна будувати рельєф траси.

Система географічних координат є найбільш поширеною і застосовується при різних областях [160]. Найкоротша відстань між будь-якими двома точками, що знаходяться на поверхні сфери, виміряної вздовж лінії, яка з'єднує ці дві точки (така лінія носить назву ортодромії) і проходить по поверхні сфери або іншій поверхні обертання є довжина дуги великого кола. Сферична геометрія відрізняється від звичайної евклідової і рівняння відстані також мають іншу форму. У евклідовій геометрії, найкоротша відстань між двома точками – пряма лінія. На сфері ж прямих ліній не буває. Ці лінії на сфері є частиною великих кіл, центри яких співпадають з центром сфери.

Через будь-які дві точки на поверхні сфери, якщо вони не прямо протилежні один одному (тобто не є антиподами), можна провести єдине велике коло. Дві

точки, поділяють велике коло на дві дуги. Довжина короткої дуги – найкоротша відстань між двома точками. Між двома точками-антиподами можна провести нескінченну кількість великих кіл, але відстань між ними буде однаково на будьякому колі і дорівнює половині довжини кола.

Обчислення відстані цим методом більш ефективно і в багатьох випадках більш точні, ніж обчислення його для спроектованих координат (в прямокутних системах координат), оскільки, по-перше, для цього не треба переводити географічні координати в прямокутну систему координат (здійснювати проекційні перетворення) і, по-друге, багато проекцій, якщо неправильно обрані, можуть призвести до значних спотворень довжин в силу особливостей проекційних спотворень.

У більшості випадків при проведені польових вимірювань не потрібно високої точності, тому стисненням Землі можна знехтувати, тобто прийняти Землю за кулю, для обчислень використовують сферу радіусом 6372795 м.

Для обчислення довжини дуги великого кола відомі наступні формули. Сферична теорема косинусів. У разі малих відстаней і невеликої розрядності обчислення (кількість знаків після коми), використання формули може призводити до значних помилок пов'язаним з округленням [161].

$$\Delta l = R \cdot \arccos(\sin \varphi_1 \sin \varphi_2 + \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 \cos \Delta \lambda)$$
(3.1)

де $R = 6372795 \ \text{м} - \text{радіус Землі}, \ \Delta \lambda - \text{різниця координат по довготі в радіанах.}$

Якщо попередня формула дає похибки при малих відстанях, то для їх усунення використовують формулу гаверсинусів.

$$\Delta l = R \cdot 2 \arcsin\left(\sqrt{\sin^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) + \cos\varphi_1 \cos\varphi_2 \sin^2\left(\frac{\Delta\lambda}{2}\right)}\right)$$
(3.2)

де $\Delta \varphi$ – різниця координат по широті в радіанах.

У випадку точок антиподів використовують наступну формулу [161]

$$\Delta l = R \cdot \arctan\left(\frac{\sqrt{\left(\cos\varphi_{2}\sin\Delta\lambda\right)^{2} + \left(\cos\varphi_{1}\sin\varphi_{2} - \sin\varphi_{1}\cos\varphi_{2}\cos\Delta\lambda\right)^{2}}}{\sin\varphi_{1}\sin\varphi_{2} - \cos\varphi_{1}\cos\varphi_{2}\cos\Delta\lambda}\right)$$
(3.3)

У випадку малих відстаней між двома точками можна використовувати прямокутну систему координат, у якій відстань між двома точками рівна

$$\Delta l = R \cdot \sqrt{(\sin\varphi_2 \cos\lambda_2 - \sin\varphi_1 \cos\lambda_1)^2 + (\sin\varphi_2 \sin\lambda_2 - \sin\varphi_1 \sin\lambda_2)^2 + (\cos\varphi_2 - \cos\varphi_1)^2} \quad (3.4)$$

У лабораторних умовах розрахунок відстані за двома координатами GPS можна легко виконати у програмі SAS Planet (Google Maps, Google Earth і т.д) за допомогою інструменту лінійка (рис. 3.20). У польових умовах не завжди є можливість скористатись таким способом, тому для підвищення оперативності вимірювань і обробки результатів відстань для обчислення відстані між двома точками була вибрана формула (3.2).



Рис. 3.20. Визначення відстані між двома точками у програмі SAS Planet

Оскільки мікроконтролер використаний у приладі ВПП може виконувати тільки прості арифметичні операції, тому для визначення відстані між двома вимірами в натурних умовах формулу (3.2) було зведено до простішого вигляду використовуючи розклад в ряд Тейлора в околі нуля наступних функцій:

$$\sin x = x - \frac{1}{6}x^3 + \frac{1}{120}x^5 - \dots$$
(3.5)

117

$$\cos x = x - \frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{24}x^4 - \dots$$
(3.6)

$$\arcsin x = x + \frac{1}{6}x^3 + \frac{3}{40}x^5 + \dots$$
(3.7)

підставивши формули (3.5)-(3.7) у формулу (3.2) і виконавши спрощення отримаємо наступний вираз:

$$\Delta l = \left(-\frac{1}{12} \frac{-12d^2 - 12c^2 + 3c^2\varphi_1^2 + 3c^2\varphi_2^2 - 4c^2d^2}{\sqrt{d^2 + c^2}} \right) \cdot 2R$$
(3.8)

 $\exists e \ d = \frac{\Delta \varphi}{2}, \ c = \frac{\Delta \lambda}{2}.$

Корінь квадратний $\sqrt{d^2 + c^2}$ шукаємо методом Нютона (послідовного наближення):

$$a_{i+1} = \frac{1}{2} \left(a_i + \frac{x}{a_i} \right)$$
(3.9)

де *i* – номер ітерації, $x = \frac{d+c}{2}$ – початкове наближення.

Значення d, c знаходяться в інтервалі $10^{-8} \div 10^{-5}$ радіан, що дозволяє визначити відстань між двома вимірами в натурних умовах від 1 до 1000 метрів.

Практичне використання вище описаних способів обчислення відстані на прикладі натурних вимірювань, які були проведені показуємо на магістральному газопроводі "Опари-Угерсько" (рис. 3.20). Координати першого і $(\varphi_1 = 49^{\circ}21.28', \lambda_1 = 23^{\circ}42.98')$ другого вимірів становлять відповідно i $(\varphi_2 = 49^{\circ}21.28', \lambda_1 = 23^{\circ}42.99')$. Відстань між першим і другим вимірами, визначена у програмі SAS Planet становить 13,32 м, а відстань обчислена по формулах (3.2) і (3.8) рівна відповідно 12,07400491 м та 12,07465516 м. У прямокутній системі координат для відстані між цими точками за формулою (3.4) отримуємо 14,06520427 м, що відрізняється від попередніх результатів [122].

Можливість обчислення відстані між двома сусідніми вимірами полегшує процес вимірювань і опрацювання результатів.

Висновки по розділу 3

1. Сформульовано вимоги до апаратури для вимірювань поляризаційного потенціалу підземних трубопроводів, та інших підземних металевих конструкцій з автоматичним записом вимірів у електронну пам'ять. Згідно сучасної нормативнотехнічної документації прилади для вимірювання потенціалів трубопроводів повинні мати клас точності не більше ніж 2,5 та вхідний опір не менше ніж 10 МОм.

2. Для практичної реалізації запропонованого методу визначення ПП розроблено чотириканальний прилад ВПП електронною пам'яттю та інтерфейсом і його модифікацію ВПП-М з модулем глобального позиціонування GPS.

3. Прилад ВПП-М дає змогу одночасно вимірювати постійні і змінні електричні потенціали між металом і встановленим у середовищі електродом порівняння (ЕП) та між двома ЕП середовищі з визначенням поляризаційного потенціалу поверхні металу для контролю електрохімічного захисту від корозії та виявлення місць наскрізних пошкоджень ізоляції.

4. Для вимірювання ПП у випадку захисту постійним струмом його можна модулювати сигналом з вибраною частотою або застосовувати додатковий генератор змінного струму.

5. Застосування глобальної системи позиціонування (GPS) з визначенням віддалі між вимірами полегшує визначення параметрів ізоляції ПТ і документування результатів діагностичних обстежень.

РОЗДІЛ 4

МЕТРОЛОГІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ І РОЗРОБЛЕНОЇ АПАРАТУРИ ВПП-М

4.1 Експериментальне дослідження методу визначення поляризаційного потенціалу в лабораторних умовах

Експериментальну перевірку методу визначення поляризаційного потенціалу [75, 95] проведено в лабораторних умовах на електрофізичній моделі, реалізованій у вигляді заступної електричної схеми межі металу з ізоляційним покривом в електропровідному середовищі (рис. 2.2). Відповідно до реальних значень параметрів феноменологічної схеми (рис. 4.1) вибрано такі значення елементів заступної схеми: опір ізоляційного покриву $R_i = 100 \, kOm$, поляризаційний опір $R_p = 22 \, kOm$, опір електроліту в дефекті (пошкодженні) ізоляційного покриву $R_p = 1 \, kOm$, опір ґрунту $R_g = 10 \, Om$, ємність ізоляційного покриву $C_i = 0.01 \mu F$, поляризаційна ємність $C_p = 23,65 \, \mu F$. Таким чином з (2.15) отримаємо діапазон робочих частот, рівний:

$1000 >> \omega_M >> 1.92$

Для проведення вимірювання було використано еталонний вольтметр B7– 27А, джерело живлення MPS-3010L-1 та набір стандартних опорів і конденсаторів. Вимірювання проводили для ємності ізоляційного покриття рівного $C_i = 0,7 \ \mu F$ і двох значень поляризаційної ємності $C_p = 11,5 \ \mu F$ рис. 4.2. і $C_p = 23,65 \ \mu F$ рис. 4.3. Вимірювали постійні і змінні напруги, які відповідають величинам U_{mg} , V_{mg} , U_{gg} , V_{gg} та змінну напругу на опорі R_P (рис. 4.4). За формулою (1) розраховували U_{ps} та порівнювали її з виміром постійної напруги U_{pe} на опорі R_P . Зазначимо, що в реальних умовах поляризаційна ємність набагато більша: так у розрахунках для сталевих магістральних трубопроводів значення ємності подвійного електричного шару приймають у межах 0,25 – 0,6 F/m² [73].



Рис. 4.1. Заступна електрична схема межі металу з ізоляційним покриттям в електропровідному середовищі



Рис. 4.2. Залежність поляризаційної різниці потенціалів U_p від частоти змінного струму f за вимірами на макеті заступної схеми при $C_p = 11,5 \ \mu F : 1 - виміряне$

значення U_{ps} ; 2 – розраховане значення U_{pe}



Рис. 4.3. Залежність результату моделювання поляризаційної різниці потенціалів U_p від частоти змінного струму f за вимірами на макеті заступної схеми при $C_p = 23,65 \ \mu F : 1$ – виміряне значення U_{ps} ;

2 – розраховане значення Upe



Рис. 4.4. Залежність змінної напруги виміряної на імітаторі поляризаційного опору R_p від частоти змінного струму при $C_p = 23,65 \ \mu F$

З рис. 4.2 та 4.3 видно, що за частот змінного струму 200 Гц і більше розраховане значення поляризаційного потенціалу U_{PS} практично дорівнює різниці потенціалів U_{Pe} , виміряній на R_p при постійному струмі. За менших частот C_P не шунтує R_p , (рис. 4.4) що зумовлює некоректне визначення ПП за формулою (1).

Враховуючи, що в реальних умовах значення ємності C_p набагато більше, ніж використане у заступній схемі під час експерименту, можна стверджувати, що умова (2) виконуватиметься і для менших частот змінного струму. Це підтверджує придатність запропонованого методу для практичних вимірювань поляризаційного потенціалу металу в електропровідному середовищі [75].

4.2 Лабораторні випробування макету приладу ВПП для вимірювання поляризаційного потенціалу

Для перевірки правильності роботи розробленої цифрової частики макету приладу ВПП (п. 3.2) були проведені лабораторні випробування [93]. Використано еталонний вольтметр В7–27А, джерело живлення MPS-3010L-1 та виготовлений макет ВПП. Схема вимірювань показана на рис. 4.5.



Рис. 4.5. Схема випробовування цифрової частини макету приладу ВПП

Результати проведених вимірювань відхилення dU=U_{вим}-U_{ет} показані на рис 4.6 та його відносного значення – на рис. 4.7.



Рис. 4.6 Абсолютна похибка при вимірюваннях напруги макетом приладу ВПП



Рис. 4.7. Відносна похибка при вимірюваннях напруги макетом приладу ВПП

За результатами лабораторних випробувань макету приладу ВПП для контролю стану протикорозійного захисту (ПКЗ) ПТ встановлено наступне:

1. Макет ВПП забезпечує вимірювання постійних і змінних електричних напруг з похибкою $\pm 1,5$ % в діапазоні від 0,5 до 2,5 В, та ± 10 % в діапазоні від 0,003 до 0,5 В. Мінімальна вимірювана напруга становить 0,003 В.

2. Результати вимірювань автоматично фіксуються у пам'яті ВПП, що суттєво полегшує подальше їх опрацювання.

3. Створений макет вимірювача поляризаційного потенціалу ВПП може бути використаний для натурних обстежень і контролю електрохімічного захисту підземних трубопроводів.

Для дослідження передаточних характеристик чотирьох каналів макету приладу ВПП були проведені виміри частотних характеристик відповідних каналів [94]. Схема вимірювання зображена на рис. 4.8.



Рис. 4.8. Схема вимірювання передаточних характеристик створеного макету вимірювача постійних і змінних електричних напруг

Залежності коефіцієнта передачі чотирьох каналів макету приладу ВПП показані на рисунках 4.9–4.14 для різних значень вхідної напруги.



Рис. 4.9. Залежності коефіцієнтів передачі Кт, Кs каналів макету ВПП від частоти. Амплітудне значення вхідної змінної напруги 100 мВ



Рис. 4.10 Залежності коефіцієнта передачі Кт, Кs каналів макету ВПП від частоти. Амплітудне значення вхідної змінної напруги 500 мВ



Рис. 4.11. Залежності коефіцієнта передачі Кт, Кs каналів макету приладу ВПП від частоти. Амплітудне значення вхідної змінної напруги 5 В



Рис. 4.12. Залежність вихідної напруги від постійної вхідної напруги для каналу **m**



Рис. 4.13. Залежність вихідної напруги від постійної вхідної напруги для каналу **s**



Рис. 4.14. Залежність коефіцієнта передачі каналів **m** і **s** від постійної вхідної напруги

4.3 Лабораторні випробування зразка апаратури ВПП-М та коректування схем

Лабораторні випробування виготовленого зразка апаратури ВПП-М виконані у відділі № 26 ФМІ НАН України [95, 122]. Проведено наступні роботи.

1. Перевірка роботи мікроконтролера в режимах вимірювання та зчитування, правильності виводу інформації на цифровий дисплей, коректування програми мікроконтролера. Регулювання контрастності символів.

2. Перевірка роботи блоку живлення на відповідність напруг живлення та споживаної потужності заданим характеристикам. Коректування схеми з метою зменшення пульсацій по живленню. Перевірка блоку заряду акумулятора та схеми контролю стану акумулятора. Регулювання рівня зарядного струму та порогу індикації повного розряду акумулятора.

3. Перевірка АЧХ смугових фільтрів двох каналів для вимірювання змінної напруги, коректування частоти пропускання фільтрів 100 гц.

4. Зняття характеристик каналів вимірювання потенціалів, коректування коефіцієнту підсилення та ідентичності показів при різних полярностях.

5. Перевірка роботи АЦП аналогових каналів.

6. Перевірка роботи приймача GPS та коректність передачі даних.

7. Перевірка роботи апаратури при заданих вхідних напругах на виході тестового генератора і джерела постійної напруги та правильність розрахунку поляризаційного потенціалу.

8. Перевірка коректності запису даних вимірювань та даних приймача GPS у пам'ять апаратури, а також вивід записаних даних у режимі зчитування.

9. Перевірка коректності передачі записаних даних на ПК по інтерфейсу RS-232.

10. Перевірка кріплення елементів схеми, давачів, акумулятора, індикатора та панелі управління.

За результатами лабораторних випробувань проведено коректування принципової електричної схеми та налагодження коефіцієнтів підсилення і частоти пропускання фільтрів аналогових каналів апаратури ВПП-М.

Проведено удосконалення та оптимізація програми мікроконтролера PIC цифрової частини апаратури ВПП-М.

Укладено технічний опис та керівництво до експлуатації апаратури ВПП-М (Додаток А).

4.4 Метрологічні дослідження виготовленої апаратури ВПП-М

Для проведення метрологічних досліджень розробленої апаратури ВПП-М, з використанням науково-технічної літератури [164-168, 173] та нормативної документації [10, 169, 170] укладено програму метрологічної атестації апаратури ВПП-М (Додаток В). Результати проведених метрологічних досліджень наведені у протоколі (Додаток В). У результаті проведених метрологічних досліджень встановлено наступне.

Під час проведення зовнішнього огляду встановлено відповідність приладу ВПП-М наступним вимогам:

- прилад ВПП-М не має механічних пошкоджень;

- наявність і чіткість написів на панелі приладу ВПП-М.

Перевірено комплектність згідно з Технічним описом приладу ВПП-М.

Опробування приладу ВПП-М відбувалось в наступній послідовності:

1. Включити живлення. На входи "М–Ел.П" і "Ел.П–Д.Ел" подати постійну напругу. Перевірити відповідність показів індикатора U_{mg} , U_{gg} значенням вхідних сигналів.

2. На входи "М–Ел.П" і "Ел.П–Д.Ел" подати змінну напругу. Перевірити відповідність показів індикатора V_{mg} , V_{gg} значенням вхідних сигналів.

3. На входи "М–Ел.П" і "Ел.П–Д.Ел" подати змінну напругу з постійною складовою рис. 4.15. Записати покази індикатора приладу ВПП-М. Розрахувати значення поляризаційного потенціалу за формулою

$$U_p = U_{mg} \cdot V_{mg} \cdot U_{gg} / V_{gg} . (1.10)$$

 U_{gg}

-1,023

-0,426

+8.91 + 1.023

+5.50 + 0.924

 $\sim V_{mg}$

~5.50

~6.02

~3,04

~1,49

 $\sim V_{gg}$

~0.491

~0.889 +2.58

~0.955 -0.32

~0.249 +5,36

 U_p

-1,63

Зіставити розраховане значення U_p з показом індикатора.

 U_{gg}

-1,023

-0,426

+8.91 + 1.023

+5.50 + 0.924

 U_{mg}

-7,96

+2,81

 $\sim V_{mg}$

~5.50

~6.02

~3,04

~1,49

~0.889

~0.955

~0.491

~0.249

4. Натискаючи кнопку "ЗАПИС" провести запис даних у пам'ять. Отримані результати опробування показані в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Перевірка коректності обчислень та роботи пам'яті ВПП-М Зчитані з пам'яті дані Записані в пам'ять дані $\overline{\sim}V_{gg}$

 U_{mg}

-7,96

+2,81

 U_p

+2.58

-0.32

-1,63

+5,36

5. Перевести	прилад	у	режим	"зчитування"	(ВПП-М,	КЕ,	п.6.3.1).
Перевірити достої	вірність за	апи	саних у г	ам'ять даних.			

4.4.1 Перевірка технічних характеристик приладу ВПП-М

Основними технічними характеристиками приладів для вимірювань потенціалів під час діагностичних обстежень і контролю протикорозійного захисту підземних трубопроводів, згідно нормативно-технічної документації [10], є вхідний опір і похибки вимірювань. Практично важливою також є споживана потужність засобів обстежень і контролю.

Перевірку вхідного опору вольтметрів приладу ВПП-М виконують за схемою, показаною на рис. 4.15. Використовують джерело живлення постійної напруги, резистор R номіналом 10 МОм $\pm 1\%$ та перемикач S.

Вимірювання вхідного опору виконують у такій послідовності:

1. На виході джерела живлення встановити вихідну напругу 1 В.

2. При верхньому положенні перемикача S зчитати покази вольтметрів постійної напруги приладу ВПП-М по обох каналах (U).



Рис. 4.15. Схема перевірки вхідного опору приладу ВПП-М: 3 – прилад ВПП-М; 4 – блок живлення; *S*₁ – ключ; *R*₁ – резистор номіналом 10 МОм ±1%

3. Встановити перемикач у нижнє положення і зчитати покази вольтметрів постійної напруги приладу ВПП-М по обох каналах (U_a).

4. Покази занести в таблицю 4.2 та розрахувати вхідний опір кожного каналу за формулою:

$$R_{ex} = \frac{R}{\frac{U}{U_a} - 1} \tag{4.1}$$

Канал	U, B	U _a , B	R _{вх} , МОм
М – Ел.П	1,0	0,503	10.1
Ел.П – Д.Ел	1,0	0,503	10.1

Таблиця 4.2 – Визначення вхідного опору приладу ВПП-М

Робочу частоту f_r приладу ВПП-М визначали по схемі зображеній на рис. 4.16 підтримуючи постійну величину і частоту напруги в приладі. Результати вимірювання наведені на рис. 4.17.



Рис. 4.16. Схема дослідження робочої частоти приладу ВПП-М: 2 – частотомір; 3 – ВПП-М; 4 – генератор; R_1, R_2 – дільники напруг



Рис. 4.17. Визначення робочої частоти каналів змінної напруги приладу ВПП-М

Для визначення найбільшої споживаної потужності приладу ВПП-М у коло джерела живлення включали амперметр і вольтметр так як показано на рис. 4.18. Міряли протікаючий струм I_n у різних режимах роботи апаратури, вибрали найбільше значення струму. Міряти напругу акумуляторів U_n . Найбільшу споживану потужність P_n обчислювали по формулі:

$$P_n = I_n \cdot U_m = \frac{V_7}{R_3} \cdot U_n \tag{4.2}$$



Рис. 4.18. Схема дослідження споживаної потужності приладом ВПП-М: 3 – прилад ВПП-М; 7 – вольтметр В7-37; 8 – блок живлення; S_I – ключ; R_3 – резистор 10 Ом±0,5%

Встановлено, що потужність приладу ВПП-М становить:

- потужність споживання в режимі вимірювання = 0,75 Вт;
- потужність споживання в режимі зчитування = 0,075 Вт.

4.4.2 Визначення інструментальних похибок приладу ВПП-М

Вимірювання постійної напруги провести за схемою показаною на рис. 4.19. Електронний блок ВПП-М переключити у режим "ВИМІР" і підключити два входи "М–Ел.П" і "Ел.П–Д.Ел" до виходу джерела постійної напруги U_i . Паралельно до цього ж виходу джерела постійної напруги підключити вольтметр 2 постійної напруги U_{et} .



Рис. 4.19. Схема вимірювань постійних напруг: 1 – джерело постійної напруги; 2 – вольтметр постійної напруги; 3 – ВПП-М; *S*₁ –ключ, *R*₁, *R*₂ – дільники напруг

Вимірювання змінної напруги провести за схемою показаною на рис. 4.20. Електронний блок ВПП-М переключити у режим "ВИМІР" і підключити два входи "М–Ел.П" і "Ел.П–Д.Ел" до виходу генератора V_i . Паралельно до цього ж виходу генератора підключити вольтметр змінної напруги V_{et} . Настроїти генератор на частоту 100 ± 0,5 Гц і контролювати її частотоміром.



Рис. 4.20. Схема вимірювань змінних напруг. 3 – прилад ВПП-М; 4 – генератор; 5 – частотомір; 6 – вольтметр змінної напруги; *S*₁ –ключ, *R*₁, *R*₂ – дільники напруг

Визначення основної похибки вимірювання напруги з частотою 100 Гц провести в чотирьох точках: 25, 50, 75, 100 % найбільшого значення діапазону. У кожній точці діапазону провести по десять вимірювань. Виміряні значення напруги U_{im} занести в табл. 4.3.

Канал	М-Ел.П	Ел.П-Д.Ел
δU %	0,7	1,0
δV %	0,4	1,2

Таблиця 4.3 – Основна відносна похибка вимірювання напруг

За допомогою кліматичної камери і методики ГОСТ 12261-82 температуру електронного вимірювального блоку ВПП-М доводимо до 30°С. Проводимо вимірювання постійної і змінної напруг.

Температуру електронного блока ВПП-М за допомогою кліматичної камери і методики ГОСТ 12261-82 довести до 0°С. Проводимо аналогічні вимірювання.

Отримані результати опробування показані в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Додаткова температурна похибка вимірювання напруг

Канал	М-Ел.П	Ел.П-Д.Ел
δU %	0,3	0,5
δV %	0,2	0,4

Додаткову похибку вимірювання напруги визначаємо при мінімальній напрузі живлення 7,2 *В*. У середині діапазону вимірювання напруг ВПП-М проводимо десять вимірювань напруги.

Отримані результати опробування показані в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Додаткова похибка при мінімальній напрузі живлення

Канал	М–Ел.П	Ел.П-Д.Ел
δU %	0,2	0,2
δV %	0,2	0,2

4.4.3 Визначення методичних похибок

Оскільки поляризаційний потенціал безпосередньо не вимірюється, то є потреба у визначенні методичної похибки [167] визначення ПП. У випадку непрямих вимірювань деякої фізичної величини y = f(x, z, ..., t), де x, z, ..., t – результати прямих вимірювань, а y – результат непрямих вимірювань. Значення сумарної абсолютної похибки непрямого вимірювання шукають по формулі

$$\Delta_{y} = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^{2}} \Delta_{x}^{2} + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^{2} \Delta_{y}^{2} + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)^{2} \Delta_{t}^{2}$$
(4.3)

Використовуючи формули (1.10) і (4.3), знаходимо значення сумарної абсолютної похибки визначення поляризаційного потенціалу запропонованого методу. Для цього знаходимо частині похідні ПП для всіх чотирьох напруг

$$\frac{\partial U_p}{\partial U_{mg}} = \frac{\partial \left(U_{mg} - \frac{U_{gg}}{V_{gg}} V_{mg} \right)}{\partial U_{mg}} = 1$$
(4.4)

$$\frac{\partial U_p}{\partial V_{mg}} = -\frac{U_{gg}}{V_{gg}} \tag{4.5}$$

$$\frac{\partial U_p}{\partial U_{gg}} = -\frac{V_{mg}}{V_{gg}} \tag{4.6}$$

$$\frac{\partial U_p}{\partial V_{gg}} = -U_{gg} V_{mg} \frac{1}{V_{gg}^2}$$
(4.7)

Підставивши отримані значення частинних похідних у формулу (4.3), для сумарної абсолютної похибки отримуємо

$$\Delta U_{p} = \sqrt{\Delta U_{mg}^{2} + \left(\frac{U_{gg}}{V_{gg}}\right)^{2} \Delta V_{mg}^{2} + \left(\frac{V_{mg}}{V_{gg}}\right)^{2} \Delta U_{gg}^{2} + \left(\frac{U_{gg}V_{mg}}{V_{gg}^{2}}\right)^{2} \Delta V_{gg}^{2}}$$
(4.8)

Для виміряних значень U_{mg} =-1,14 В, V_{mg} =0.38 В, U_{gg} =-0,023 В, V_{gg} =0.09 В, ΔU_{mg} = ΔV_{mg} =0.01 В, ΔU_{gg} = ΔV_{gg} =0.001 В отримуємо, що U_p =-1,04 В а підставивши ці значення у формулу (4.8), отримуємо абсолютну похибку ΔU_p =0,011 В. Відносна методична похибка визначення поляризаційного потенціалу, спричинена похибками вимірювань постійних і змінних електричних напруг, становить 1,06%.

Крім цього методичну похибку може спричинювати неточне розміщення електродів порівняння відносно об'єкту контролю. Для аналізу цієї складової похибки використаємо залежності поперечної напруги від координат електродів порівняння відносно підземного трубопроводу [171, 172]. Різниця потенціалів $\Delta \varphi$ (електрична напруга U_x) між двома точками A і B поверхні, коли одна з точок розміщена над трубою A(0,h), а друга точка B(b,h) віднесена перпендикулярно трубопроводу на відстань x від першої, така:

$$U_{x} = \Delta \varphi(0-b) = \int_{A}^{B} \frac{I_{s} \rho_{g} x}{\pi \left(x^{2} + h^{2}\right)} dx = \frac{I_{s} \rho_{g}}{2\pi} \ln \left(1 + \frac{b^{2}}{h^{2}}\right).$$
(4.9)

де ρ_g міряється в Ом м, I_s – в А/м, U_x – у В.

Але U_x залежить і від розносу електродів, від глибини залягання труби та від опору ґрунту, що спричинює похибки електрометричних обстежень. Для зменшення похибок, спричинених змінами глибини залягання трубопроводу вздовж траси, доцільно вибирати рознесення електродів не меншим ніж п'ять глибин залягання труби $b \ge 5h$.

Розглянемо похибку міряння поперечної напруги, спричинену зміщенням електрода від проекції осі труби на поверхню землі. Якщо перший електрод встановлений не точного над віссю труби, а зміщений на деяку відстань x, то для напруги U між точками A(x,h) і B(b+x,h) отримуємо:

$$U = U_x - sign(x)\Delta\varphi = \frac{I_s \rho_g}{2\pi} \left[\ln\left(1 + \frac{(b+x)^2}{h^2}\right) - sign(x)\ln\left(1 + \frac{x^2}{h^2}\right) \right].$$
(4.10)

Відношення $\Delta \phi/U_x$ описує відносну похибку методу "поперечного градієнта"

$$\delta U_x = \Delta \varphi / U_x = \ln \left(1 + \frac{x^2}{h^2} \right) / \ln \left(1 + \frac{(b+x)^2}{h^2} \right) , \qquad (4.11)$$

спричинену зміщенням х електрода А від проекції осі труби на поверхню землі.

На (рис. 4.21) показано результати розрахунку цієї похибки для трьох глибин залягання осі труби. При розносі електродів b=5 m зміщення x=0,5 m електрода A від осі спричинює похибку поперечного градієнта від 3 до 7 % і більше (за малих глибин). Зі збільшенням розносу електродів у 6 разів при даних глибинах h похибка dU_x зменшується лише у 2 рази.

За методом винесення електрода для міряння різниці потенціалів "трубаземля" U_{mg} виносний електрод встановлюють над віссю труби. При неточному розташуванні виникає похибка, яку за даним вище співвідношенням визначаємо так:

$$\delta U = \Delta \varphi / U_{mg} = \ln \left(1 + \frac{x^2}{h^2} \right) / 2\xi \quad , \tag{4.12}$$

тут введено характеристику траси – опірний коефіцієнт трубопроводу



 $\xi = \frac{R_{mg}}{D\rho_g}.$ (4.13)

Рис. 4.21. Похибка sU_x залежно від зміщення x електрода порівняння відносно осі труби [171]

Як видно з рис. 4.21 зміщення виносного електрода на 0,5 м при h < 1 м спричинює похибку міряння потенціалу поляризації труби 0,1 % і більше. Конкретна величина похибки залежить від опірної характеристики траси, тобто від співвідношення (4.13). За інших однакових умов похибка буде тим більшою, що більші діаметр труби і опір ґрунту та гірша ізоляція ПТ.



Рис. 4.22. Похибки міряння напруги "труба-земля" залежно від зміщення *х* електрода для різних глибин *h* залягання ПТ [171]

Допустиме зміщення електрода A від проекції осі труби на поверхню землі, для забезпечення достатньої точності (максимально допустимої похибки δU) міряння U_{mg} , згідно з виразами (4.12) оцінюється нерівністю:

$$\Delta x_A < h \left(e^{2\xi \delta U} - 1 \right)^{\frac{1}{2}} \approx h e^{\xi \cdot \delta U} \,. \tag{4.14}$$

Отже, під час обстежень допустиме зміщення Δx_A електрода залежить від діаметра трубопроводу *D*, відношення опору ґрунту ρ_g до опору ізоляції R_{mg} та від глибини *h* залягання трубопроводу.

Таким чином, зміщення електрода A як і зміна глибини h залягання ПТ змінюють значення вимірюваної різниці потенціалів труба-земля U_{mg} , що спричинено зміною опору ґрунту між металом ПТ і ЕП. Виміри поперечної напруги в ґрунті також залежать від розміщення електродів A і Б та інших параметрів (опорів ізоляції, ґрунту, діаметра труби і глибини її залягання). Проте, оскільки згідно з запропонованим методом омічна складова вилучається (елімінується), то вимір поляризаційного потенціалу з вилученням омічного складник не залежить від зміщення електродів. Проте вказані похибки необхідно враховувати під час пошуку пошкоджень ізоляції за методами Пірсона і поперечного градієнта потенціалу. Крім цього, вибране розміщення електродів (ЕП якнайближче до ОК а ДЕ на певній відстані) забезпечує найбільшу чутливість методу визначення ПП та найменший вплив завад за даних умов обстежень ПТ.

Висновки по розділу 4

1. Проведено експериментальну перевірку методу визначення поляризаційного потенціалу та метрологічні дослідження розробленої апаратури ВПП-М.

2. З використанням заступної електричної схеми межі метал-ізоляціясередовище в лабораторних умовах експериментально перевірено запропонований метод визначення поляризаційного потенціалу. Отримали, що для вибраного діапазону частот значення ПП практично не залежить від частоти і приблизно дорівнює різниці потенціалів, безпосередньо виміряній на імітаторі поляризаційного опору при постійному струмі, що підтверджує придатність методу для практичних вимірювань поляризаційного потенціалу металу в електропровідному середовищі.

3. За результатами лабораторних випробувань виготовленого зразка апаратури ВПП-М проведено удосконалення та оптимізація програми мікроконтролера РІС цифрової частини апаратури ВПП.

4. Метрологічними дослідженнями підтверджено відповідність технічних характеристик ВПП-М нормативним вимогам до апаратури для обстежень ПТ. Встановлено, що основна інструментальна відносна похибка вимірювань потенціалів по чотирьох каналах не перевищує 1,2 %; сумарна непевність результатів не перевищує 2 %. Наведено вираз методичної похибка визначення ПП, яка для проведених вимірювань не перевищує 1,1 %.

РОЗДІЛ 5

НАТУРНІ ВИПРОБУВАННЯ АПАРАТУРИ ВПП-М

Натурні випробування виготовлених зразків апаратури ВПП та ВПП-М проводили на трасах підземних магістральних газопроводів Івацевичі-Долина, ІІ і III нитки, Угерсько-Львів біля с. Деревач, розподільчого газопроводу Липники-Львів на ділянці УКЗ Солонка – Жирівка та Опари-Липники Бібрського ЛВУМГ Управління МГ "Львівтрансгаз" ДК "Укртрансгаз" НАК «Нафтогаз України». 120-123] У випробуваннях [93-95, брали участь представники УМГ «Львівтрансгаз». З апаратурою та результатами її випробувань і використання ознайомлені представники газопромислового управління (ГПУ) також «Львівгазвидобування» та Карпатського експертно-технічного центру Держпраці (Додаток Ж).

5.1 Підготовка до роботи та визначення поляризаційного потенціалу в натурних умовах

Робота пристрою відбувається наступним чином (Додаток А). Підсилювачі і фільтри обох каналів вимірювань змінних електричних напруг настроюють на частоту змінної складової електричної напруги між об'єктом контрою (ОК) і середовищем. Вибирають частоту гармоніки випрямленого пульсуючого струму установки катодного захисту (УКЗ), чи частоту генератора, який збуджує змінну напругу між ОК і середовищем.

За показаною на рис. 5.1 схемою підключають до гнізда М пристрою ВПП-М вивід від поверхні металу підземного трубопроводу (через контрольновимірювальний пункт). До гнізда Ел.П підключають мідносульфатний електрод порівняння, розміщений на поверхні ґрунту над трубопроводом. До гнізда Д.Ел. підключають допоміжний мідносульфатний електрод, розміщений у середовищі перпендикулярно до осі ПТ і віддалений на відстань порядку 2...6 значень глибини залягання трубопроводу. У випадку блукаючих струмів ДЕ розміщують зліва і справа від ПТ, за поляризаційний потенціал приймають середнє значення результатів вимірювань.



Рис. 5.1. Схема підключення електродів до приладу ВПП-М: КВП – вимірювальний пункт; ЕП електрод порівняння; ДЕ – допоміжний електрод

Після увімкнення пристрою значення чотирьох вимірюваних напруг (з урахуванням полярності постійних напруг) виводяться на цифровий індикатор. При цьому мікропроцесор розраховує значення поляризаційного потенціалу [122] та виводить його на індикатор. За командою оператора усі виміряні величини (дві напруги постійні, дві змінні, поляризаційний потенціал, координати і час вимірювання) заносяться у пам'ять з присвоєнням чергового номеру вимірювань.

Відтворення записаної інформації на індикаторі ВПП-М можна проводити безпосередньо на трасі, або в камеральних умовах у режимі зчитування, який встановлює оператор з клавіатури. Перевід даних з пам'яті пристрою у комп'ютер здійснюється через інтерфейс спеціальною програмою «Reader VPP» (Додаток Б).



Рис. 5.2. Перевірка макета апаратури ВПП на трасі газопроводу біля с. Солонка

На відміну від відомих приладів для вимірювання ПП за релаксаційним методом "ввімкнуто-вимкнуто" (ИПП-1 "Менделеевец", "Поиск-01", «ПРИМА-2005», "MoData"), розроблений прилад ВПП-М не потребує обладнання установок катодного захисту, що діють у зоні обстеження ПТ, переривачами та їх синхронізації. Це дає змогу зменшити трудозатрати на підготовку та підвищити оперативність обстежень ПТ.

5.2 Пошук місць пошкоджень захисного покриття методом Пірсона та поперечного градієнта

Апаратура ВПП-М дозволяє одночасно вимірювати постійну різницю потенціалів та змінну електричну напругу. Це дає змогу одночасно проводити пошук пошкоджень ізоляції ПТ за відомими методом поперечного градієнта та методом Пірсона [2, 5, 8, 10, 163].

За допомогою апаратури ВПП-М проводили пошук місць пошкодження ізоляції за цими методами на ділянках ПТ. Міряли постійну і змінну напругу між ЕП, розміщеним над віссю ПТ, та допоміжним ДЕ, віднесеним від ПТ перпендикулярно до траси (рис. 5.1).

Вимірювання проводили на двох ділянках трубопроводів:

1. МГ Угерсько-Львів діаметром Ду=500 мм, з діючою установкою катодного захисту біля с. Деревач;

2. РГ Липники – Персенківка, діаметром Ду=500 мм з діючою установкою катодного захисту КСС 1200-24/48-У1 з вихідними параметрами катодного захисту: напруга – 20 В, струм – 7 А (біля с. Солонка).

Результати вимірювань для першої ділянки зображені графічно на рис. 5.2 за методом поперечного градієнта, та рис. 5.3 методом Пірсона.



Рис. 5.2. Розподіл вздовж магістрального трубопроводу постійної напруги "земля-земля" за даними ВПП-М (ділянка 1)



Рис. 5.3. Розподіл вздовж магістрального трубопроводу змінної напруги "земляземля" за даними ВПП-М (ділянка 1)
Як видно з отриманого розподілу постійних і змінних напруг «земляземля» маємо два місця із зниженим перехідним опором «труба-земля» (ймовірними пошкодженнями ізоляції).

Результати вимірювань для другої ділянки зображені графічно на рис. 5.4 методом поперечного градієнта, та рис. 5.5 методом Пірсона.



Рис. 5.4. Розподіл вздовж магістрального трубопроводу постійної напруги "земля-земля" за даними ВПП-М (ділянка 2)



Рис. 5.5. Розподіл вздовж магістрального трубопроводу змінної напруги "земляземля" за даними ВПП-М (ділянка 2)

Як видно з отриманого розподілу постійних і змінних напруг «земляземля» маємо один чіткий та один розмитий максимуми, що свідчить про більше локальне та менше протяжне зниження перехідного опору ПТ.

Таким чином, у результаті проведених вимірювань виявлено чотири місця з ймовірним пошкодженням ізоляції, які потребують детальнішого обстеження з кількісних (інтервалом) та оцінок i3 меншим кроком застосуванням обстеження протикорозійного комплексного методу захисту підземних трубопроводів.

5.3 Комплексні обстеження ПТ апаратурою БВС-К та ВПП-М

Комплексні обстеження ПКЗ ПТ проводимо безконтактним методом за вимірами апаратури БВС-К та контактними вимірами апаратурою ВПП-М [120, 154-156]. Наведемо результати обстеження ПКЗ на двох ділянках трубопроводів МГ Угерсько-Львів та РГ Липники – Персенківка.

Дані безконтактних вимірювань апаратурою БВС-К глибини h залягання ПТ і змінної з частотою 100 H_z складової J випрямленого пульсуючого струму УКЗ та контактних вимірів апаратурою ВПП-М постійних і змінних з частотою 100 H_z напруг і поляризаційного потенціалу наведено у табл. 1 для першої ділянки і табл. 2 для другої ділянки. Точки вимірювань l_n на другій ділянці і віддалі Δl_n між ними визначено за записаними у пам'яті апаратури координатами GPS. У даному випадку точки вимірювань струму і потенціалів співпадають; на ділянці 1 вони відрізняються.

	Виміри БВС-К			Виміри ВПП-М							
N⁰	L_{I}, m	<i>J</i> , <i>A</i>	h,m	<i>L</i> _{<i>U</i>} , <i>m</i>	U_{mg} , V	V_{mg}, V	Ugg, V	V_{gg} , V	U_p , V		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1	0	0,85	1,7								
2	20	0,87	1,8	10	-1,05	0,81	-0,017	0,097	-0,91		
3	40	0,99	1,9	30	-1,06	0,84	-0,035	0,215	-0,92		
4	60	1,05	1,8	50	-1,08	0,87	-0,021	0,127	-0,94		

Таблиця 5.1 – Виміряні параметри протикорозійного захисту ПТ (ділянка 1)

Продовження таблиці 5	.1
-----------------------	----

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5	80	1,08	1,9	70	-1,09	0,91	-0,015	0,091	-0,94
6	100	1,12	2,0	90	-1,12	0,96	-0,016	0,093	-0,95
7	120	1,16	2,0	110	-1,15	1,01	-0,014	0,085	-0,98
8	140	1,21	1,9	130	-1,17	1,04	-0,017	0,101	-0,99
9	160	1,29	2,1	150	-1,20	1,09	-0,021	0,131	-1,03
10	180	1,39	2,1	170	-1,22	1,14	-0,031	0,193	-1,04
11	200	1,48	1,9	190	-1,23	1,17	-0,030	0,185	-1,04
12	220	1,54	1,8	210	-1,25	1,19	-0,015	0,088	-1,05
13	240	1,57	2,3	230	-1,25	1,21	-0,017	0,103	-1,05
14	260	1,60	2,5	250	-1,27	1,23	-0,016	0,099	-1,07
15	280	1,62	2,5	270	-1,31	1,28	-0,017	0,095	-1,08

Таблиця 5.2 – Виміряні параметри ПКЗ ПТ (ділянка 2)

		Виміри	БВС-І	K	Виміри ВПП-М						
N⁰	<i>l</i> _n , m	<i>J</i> , <i>A</i>	h,m	$\Delta l_n, m$	U_{mg} , V	V_{mg} , V	U_{gg}, V	V_{gg} , V	U_p , V		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1	0	0,430	0,7								
2	13,7	0,421	1,2	13,7	-1,15	0,41	-0,015	0,091	-1,08		
3	29,1	0,413	1,7	15,4	-1,14	0,40	-0,017	0,105	-1,07		
4	46,4	0,404	1,6	17,3	-1,12	0,39	-0,015	0,094	-1,06		
5	65,7	0,332	1,6	19,3	-1,08	0,37	-0,02	0,125	-1,02		
6	76,4	0,313	1,4	10,7	-1,01	0,35	-0,041	0,259	-0,96		
7	89,9	0,308	1,6	13,5	-1,07	0,33	-0,035	0,219	-1,02		
8	103,7	0,301	1,6	13,8	-1,06	0,32	-0,019	0,117	-1,01		
9	119,2	0,293	1,7	15,5	-1,05	0,31	-0,016	0,101	-1,00		
10	133,5	0,286	1,7	14,3	-1,04	0,31	-0,018	0,109	-0,99		
11	146,2	0,278	1,8	12,7	-1,03	0,29	-0,015	0,094	-0,98		

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
12	158,5	0,273	1,4	12,3	-1,02	0,29	-0,013	0,081	-0,97
13	174,8	0,265	1,4	16,3	-1,01	0,28	-0,014	0,086	-0,96
14	192,8	0,256	1,5	18,0	-1,00	0,26	-0,017	0,107	-0,96
15	205,4	0,250	1,4	12,6	-0,98	0,26	-0,013	0,082	-0,94
16	222,4	0,214	1,6	17,0	-0,97	0,25	-0,015	0,094	-0,92
17	247,8	0,178	1,5	25,4	-0,92	0,25	-0,035	0,224	-0,88
18	267,1	0,171	1,6	19,3	-0,84	0,25	-0,032	0,202	-0,80
19	288,7	0,167	1,5	21,6	-0,90	0,23	-0,022	0,138	-0,86
20	305,5	0,161	1,6	16,8	-0,92	0,21	-0,017	0,107	-0,89
21	321,4	0,154	1,7	15,9	-0,91	0,20	-0,015	0,092	-0,88

Продовження таблиці 5.2

Використання вимірів постійної і змінної напруг «земля-земля» U_{gg} і V_{gg} описані в попередньому підрозділі 5.2 для пошуку пошкод ізоляції ПТ; додатково використовуємо їх для визначення коефіцієнта гармоніки струму УКЗ на різних інтервалах довжини ПТ.

5.3.1 Опрацювання вимірів струмів та потенціалів. Виявлення місць корозії

Розподіли вздовж траси вимірів глибини h залягання ПТ і струму J за даними БВС-К зображені графіками на рис. 5.6 і 5.7 для першої ділянки та рис. 5.8 і 5.9 для другої ділянки. Відомо, що струм у ПТ з відділенням від УКЗ чи іншого джерела зменшується; і навпаки – з наближенням збільшується. Якщо БВС-К дає немонотонну зміну струму, то відхилення від монотонності розцінюємо як похибки вимірювань і для коректного подальшого опрацювання їх необхідно вилучати чи згладжувати. У даному випадку виміри струму J_n розподілі монотонно вздовж ПТ (рис. 5.7 і 5.9).



Рис. 5.6. Розподіл вздовж магістрального трубопроводу вимірів глибини *h* залягання ПТ за даними БВС-К (ділянка 1)



Рис. 5.7. Розподіл вздовж магістрального трубопроводу вимірів сили струму *J* за даними БВС-К (ділянка 1)



Рис. 5.8. Розподіл вздовж магістрального трубопроводу вимірів глибини *h* залягання ПТ за даними БВС-К (ділянка 2)



Рис. 5.9. Розподіл вздовж магістрального трубопроводу вимірів сили струму *J* за даними БВС-К (ділянка 2)

Розподіл вздовж ПТ відносних витрат струму рис. 5.10 і 5.11 обчислюємо за формулою [52, 54, 125, 155]

$$\delta J_n = \frac{J_n - J_{n-1}}{\frac{1}{2} (J_n + J_{n-1}) (l_n - l_{n-1})} \cdot 100, \ \% / m$$
(5.1)

Перевищення цієї величини її критичного значення вказують місця незадовільної ізоляції [11, 125]. Місця цих перевищень δJ в обох випадках співпадають з місцями збільшення поперечної різниці потенціалів U_{GG} (градієнт) та поперечної напруги V_{GG} (метод Пірсона).



Рис. 5.10. Розподіл вздовж магістрального трубопроводу відносних витрат струму. *δJ_{кр}*=0,36 %/м – критичні відносні витрати (ділянка 1)



Рис. 5.11. Розподіл вздовж магістрального трубопроводу відносних витрат струму. *δJ_{кр}*=0,36 %/м – критичні відносні витрати (ділянка 2)

Значення сумарного перехідного опору «труба-земля» *R_{MG}* обчислюємо за формулами [11, 120, 135]

$$R_{MG} = \frac{R_b \pi D}{|\alpha_n|}, \qquad (5.2)$$
$$\alpha_n = \frac{\ln\left(\frac{I_n}{I_{n-1}}\right)}{l_n - l_{n-1}}; \qquad (5.3)$$

Перехідний питомий опір ізоляції *R_i* для кожного інтервалу *l_n* між точками вимірювань струмів ПТ обчислюють за формулами [10, 11, 135]:

$$R_{in} = U_{in} / i_n, \qquad (5.4)$$

де *i_n* – густина постійної складової струму катодного захисту [120] на *n*-ому інтервалі довжини ПТ

$$i_{n} = \frac{\Delta I_{n}}{S_{n}} = \frac{\Delta J_{n}}{\pi D (l_{n} - l_{n-1}) k_{n}},$$
(5.5)

де $k_n = \frac{V_{gg}}{U_{gg}}$ – коефіцієнт гармоніки; а падіння потенціалу на ізоляційному покриві ПТ [120]

$$U_{i} = U_{mg} - U_{gg} - U_{p}. ag{5.6}$$

За падіння потенціалу на *n*-ому інтервалі приймаємо середнє значення вимірів апаратурою ВПП потенціалів на цьому інтервалі.

Падіння напруги в ґрунті U_g буде рівне виміряній різниці потенціалів між ЕП та ДЕ U_{gg} якщо відстань *х* між електродами рівна [11, 120, 135]

$$x = h \sqrt{2\left(\frac{2h}{D} - 1\right)} \tag{5.7}$$

Результати визначення перехідного опору «труба-земля» R_{MG} за вимірами апаратури БВС-К та перехідного питомого опору ізоляції R_i за вимірами апаратури БВС-К і ВПП-М показані на рис.5.12 та 5.13. Характер розподілу $R_i(l)$ подібний до $R_{mg}(l)$, що свідчить про визначальний вплив стану ізоляційного покриву (питомого перехідного опору ізоляції, а не опору ґрунту) на отриманий розподіл.



Рис. 5.12. Розподіл вздовж магістрального трубопроводу перехідного опору "труба-земля" *R_{MG}* та перехідного опору ізоляції *R_i* ПТ (ділянка 1)



Рис. 5.13. Розподіл вздовж магістрального трубопроводу перехідного опору "труба-земля" *R_{MG}* та перехідного опору ізоляції *R_i* ПТ (ділянка 2)

Відмітимо, що описаний тут метод визначення R_i значно простіший від відомого методу [10], за яким використовують «опір розтіканню струму в грунті», який обчислюють шляхом розв'язання трансцендентного рівняння. Крім цього, недоліком відомого методу є те, що він дає лише деяке усереднене значення перехідного опору ПТ по всій зоні дії УКЗ, границі якої чітко не визначаються. На відміну від цього, описаний тут метод дає змогу визначати розподіл перехідного опору захисних покривів на різних ділянках, що суттєво підвищує інформативність обстежень і контролю стану пасивного захисту від корозії ПТ.

Виміряні значення постійної U_{mg} і змінної V_{mg} напруги "труба-земля" показані на рис.5.14-5.17. Як видно з наведених графіків їх значення з віддаленням від УКЗ загалом зменшуються, за винятком двох локальних аномалій.



Рис. 5.14. Розподіл вздовж магістрального трубопроводу постійної напруги "труба-земля" за даними ВПП-М (ділянка 1)



Рис. 5.15. Розподіл вздовж магістрального трубопроводу змінної напруги "труба-земля" за даними ВПП-М (ділянка 1)



Рис. 5.16. Розподіл вздовж магістрального трубопроводу постійної напруги "труба-земля" за даними ВПП-М (ділянка 2)



Рис. 5.17. Розподіл вздовж магістрального трубопроводу змінної напруги "труба-земля" за даними ВПП-М (ділянка 2)

Розподіл поляризаційного потенціалу для двох ділянок ПТ показано на рис 5.18 та 5.19. Як видно з рис. 5.19, в одному місці пошкодження ізоляції ПТ поляризаційний потенціал не задовольняє вимог електрохімічного захисту $U_p = -0,801$ V на інтервалі 222,4 m < l_{16} <247,8 m (n=16). На цьому інтервалі захист від корозії не забезпечено. Тут найбільш імовірні корозійні пошкодження ПТ, – потрібно ремонтувати ізоляційний покрив ПТ або коригувати катодну поляризацію. Границі ділянки ПТ з незадовільним захистом від корозії (стан

ізоляції і поляризації) можна уточнити описаними методами, проводячи додаткові виміри з інтервалом 1-2 метри (сумірним з глибиною залягання ПТ).



Рис. 5.18. Розподіл вздовж магістрального трубопроводу поляризаційного потенціалу за даними ВПП-М (ділянка 1)



Рис. 5.19. Розподіл вздовж магістрального трубопроводу поляризаційного потенціалу за даними ВПП-М (ділянка 2)

Числові результати вимірювань і визначення параметрів корозійного стану ПТ на двох вказаних вище ділянках наведені у табл. 5.3 та 5.4.

За результатами натурних випробувань приладу ВПП-М для контролю стану протикорозійного захисту підземного трубопроводу встановлено.

1. Прилад ВПП-М (модуль GPS) вірно показує координати точки вимірювань.

n 1 m		$\Delta J/\Delta S$,			R_{mg} ,	R_i ,	Ізоляція	Катодна
n	ι, π	mA/m ²	U_{mg} , V	U_p , v	$\Omega \cdot m^2$	$\Omega \cdot m^2$	захисна	поляризація
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1-2	20	0,12	-1,05	-0,91	1892	1569	+	+
3	40	0,65	-1,06	-0,92	341	229	—	+
4	60	0,29	-1,08	-0,94	748	545	—	+
5-8	80-	0,14÷	-1,09÷	-0,94÷	1561÷	1201÷	+	+
5.0	140	0,21	-1,17	-0,99	1042	826	I	I
9	160	0,32	-1,2	-1,03	687	527	—	+
10	180	0,37	-1,22	-1,03	589	416	—	+
11	200	0,31	-1,23	-1,04	701	481	—	+
12-	220-	0,2÷0,	-1,25÷	-1,05÷	1107÷	808÷	+	+
15	280	06	-1,31	-1,08	3541	2608	т	Т

Таблиця 5.3 – Результати вимірювань і визначення параметрів ПКЗ (Ділянка 1)

Таблиця 5.4 – Результати вимірювань і визначення параметрів ПКЗ (Ділянка 2)

	1	$\Delta J/\Delta S$,			R_{mg} ,	R_i ,	Ізоляція	Катодна
n	<i>l</i> , <i>m</i>	mA/m ²	U_{mg} , V	U_p , v	$\Omega \cdot m^2$	$\Omega \cdot m^2$	захисна	поляризація
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1-4	0-	0,15÷	-1,15÷	-1,08÷	2293÷	1656÷	+	+
	46,4	0,12	-1,07	-1,01	997	1321		
5	65,7	1,02	-1,01	-0,96	224	101	—	+
6	76,4	0,81	-1,07	-1,02	747	228	—	+
7-	89,9-	0,17÷	-1,06÷	-1,01÷	2732÷	1804÷	+	+
14	205,4	0,22	-0,97	-0,93	1273	858	I	I
15	222,4	0,96	-0,92	-0,88	283	113	—	+
16	247,8	0,64	-0,84	-0,80	239	43	—	—
17	267,1	0,16	-0,90	-0,86	1097	417	—	+
18	288,7	0,08	-0,92	-0,89	1858	1074	+	+

2. Апаратура ВПП-М забезпечує вимірювання постійних і змінних електричних напруг «труба-земля» та «земля-земля» та визначення поляризаційного потенціалу ПТ з показом вимірів на цифровому індикаторі.

3. Результати вимірювань автоматично фіксуються у пам'яті ВПП-М, що суттєво полегшує подальше їх опрацювання.

4. Апаратура ВПП-М може бути використана для діагностичних обстежень і контролю електрохімічного захисту від корозії підземних трубопроводів та інших металевих конструкцій в електропровідному середовищі.

5.3.2 Документування результатів контролю ПКЗ ПТ

Для наочності оформлення документації по проведених обстеженнях, крім традиційних описів, таблиць, графіків, ілюстрацій, місця вимірювань доцільно нанести на карту. Це суттєво полегшує орієнтування на місцевості для виконання профілактичних, ремонтних, господарських робіт на трасах ПТ.

За допомогою програми SAS Planet дані GPS (залежно від вимог) можна наносити на різні карти (векторні, кадастрові, топографічні та інші) і фотографічні зображення поверхні Землі зі супутника (рис. 5.20).



Рис. 5.20. Розміщення ділянки вимірювань на різних типах карт

Приклади розміщення на карті місць проведених вимірювань під час комплексних обстеженнь ділянок підземних газопроводів Липники–Львів та Опари–Липники показані на рис. 5.21.



Рис. 5.21. Розміщення ділянок обстежень ПТ: *а* – векторна карта; *б* – знімок з космосу

5.4 Програмне забезпечення приладу ВПП-М

Для опрацювання і документування результатів вимірювань розроблено комп'ютерну програму «Програма опрацювання вимірів постійних і змінних електричних напруг та поляризаційного потенціалу» [157] або скорочено «Reader VPP». Розроблена програма призначена для ідентифікації підключення вимірювача постійних і змінних електричних напруг та поляризаційного потенціалу ВПП-М до інтерфейсу RS-232 ПК.

Програма «Reader VPP» забезпечує прийом у ПК даних вимірювань, проведених приладом ВПП-М, з пам'яті приладу (номер вимірювання, вимірювані величини, координати та час) і можливість опрацювання проведених вимірів та формування таблиць даних. Для більш детальної обробки та документування «Reader VPP» дає змогу експортувати всі дані у табличний редактор Exel.

Для роботи з програмою «Reader VPP» рекомендовані системні вимоги:

- Процесор: Intel Pentium або AMD Athlon з частотою не менше 1 ГГц.
- Оперативна пам'ять 256 МБ для 32-bit систем і 1 ГБ для 64-bit систем.
- Відеоадаптер: Microsoft DirectX 9 з розширенням не менше 800х600.
- Вільне місце на диску: 16 Мб.
- Операційна система: XP, Vista, Windows 7/8/10 (32-bit & 64-bit).
- Клавіатура і миша Microsoft чи сумісні вказівні пристрої.

Для запуску програми «Reader VPP» необхідно з провідника Windows (чи будь якого іншого зручного файлового менеджера) запустити файл "Reader VPP.exe" за допомогою клавіші "Enter" чи подвійного клацання лівої кнопки миші. Після цього появиться стартове вікно програми, показане на рис.5.22.



Рис. 5.22. Загальний вигляд стартового вікна програми «Reader VPP»

Для оптимізації прийому даних з апаратури ВПП передбачений пункт меню "Налаштування", показаний на рис.5.23. У програмі «Reader VPP» передбачена можливість вибору потрібного СОМ порта. По замовчуванню вибрано СОМ1. Реалізовано передачу даних по інтерфейсу RS-232 зі швидкістю від 110 до 256000 б/с. По замовчуванню встановлена швидкість 9600 б/с; оптимальна швидкість передачі 4800 б/с. Передбачено можливість передачі від 5 до 8 бітів даних. Для контролю точності передачі даних реалізовано парність передачі даних; по замовчуванню не контролюється. Також передбачено можливість вибору стопових бітів 1; 1,5 і 2; по замовчуванню стоїть 1 біт.

	Головна	-			_							
Отримати	а Відкрити	оберегти Зберегти	Експорт	Рес Налаштува	ння							
	A	ані		Параметр	и							
Зизначальн	ик приладу	VPP										
перетягн	гь сюди заго)	повок колонк	и для групув	ання по цьом	у стовпцю							
Nō ∠	U1, V	U2, V	V1, V	V2, V	Р, V потенціал	R, V	Широта	Довгот	а Висота, м	Дата	Час	
				Наті	існіть тут, ш	об задати фі	(man					
15	-0,75	0,007	0,37	0,138	-0,74	0,019	🐨 Палаш	туван	ilil	🕰 لیا تھا	13:46:22	2
14	-0,83	0,862	0,36	0,485	1,46	0,640	Порт з'є	нання			13:38:08	3
13	-0,84	0,843	0,36	0,483	1,46	0,628	Thep: Des	411411111			13:37:22	2
12	-0,79	0,855	0,32	0,485	1,35	0,564	Порт		COM1	T	13:36:17	,
11	-0,84	0,844	0,24	0,49	1,25	0,413	Шемпиіс	TL	4900		13:29:18	3
10	0,79	0,47	0,22	0	0		шондкіс	10	1000		13:27:02	,
9	-0,84	0,002	0,23	0,014	0,81	0,033	Бітів дан	них	8	· •	13:25:59	,
8	-0,8	0,002	0,24	0,013	0,77	0,037	Париість		None	100	13:25:50	j I
7	-0,85	0,852	0,22	0,507	1,21	0,370	Парністе	·	NONE		13:24:02	2
6	-0,84	0,847	0,23	0,508	1,22	0,383	Стопови	іх бітів	1	5. T .	13:21:15	5
Ę	5 -0,78	0,831	0,22	0,506	1,14	0,361					13:20:24	ł
	-0,82	0,775	0,22	0,508	1,15	0,336		ОК	Скасувати	1	13:18:36	i I
3	-0,83	0,778	0,23	0,508	1,18	0,352		100			13:18:28	3
2	-0,85	0,772	0,21	0,507	1,16	0,320					13:18:21	
1	-0,79	0,76	0,22	0,503	1,12	0,332	49°451743	24°01	3465 33	1 18.06.2019	5 13:16:55	5
	1											
30	1											

Рис. 5.23. Вікно налаштувань програми «Reader VPP»

Для зчитування даних з приладу ВПП-М необхідно за допомогою інтерфейсу RS-232 з'єднати прилад з СОМ портом ПК. Виставити необхідні налаштування для коректної передачі даних. На файловій панелі натиснути кнопку "Отримати"; при цьому кнопка буде підсвічена жовтим кольором.

Включити прилад ВПП-М і встановити режим зчитування. Натиснути і утримувати 3-5 сек. кнопку "ЗАПИС/ПК" на панелі керування ВПП-М. Процес зчитування та передачі даних відображається біжучою стрічкою на індикаторі ВПП-М.

Зчитані дані автоматично формуються у таблицю, яка розміщена в блоці даних. Отримана таблиця містить стовпчики: номер виміру «№»; постійна різниця потенціалів "труба-земля" «U1, V»; постійна різниця потенціалів "земля-земля" «U2, V»; змінна напруга "труба-земля" «V1, V»; змінна напруга "земля-земля" «V2, V»; поляризаційний потенціал «Р, V»; омічне падіння потенціалу в грунті «R, V»; «широта»; «довгота»; «висота, м»; день, місяць, рік «дата»; година, хвилина, секунда «час».

Після завершення зчитування чи обробки даних для збереження отриманої інформації потрібно у файловій панелі натиснути кнопку "Зберегти", при цьому появиться вікно провідника, в якому потрібно вибрати папку та вказати ім'я файлу для зберігання. За необхідності експортувати дані в табличний редактор Ехеl потрібно у файловій панелі натиснути кнопку "Експорт". При цьому появиться вікно провідника, в якому потрібно вибрати папку та вказати ім'я файлу для експортування.

По завершенні роботи з програмою «Reader VPP» натиснути червоний хрестик у правому верхньому куті вікна програми.

Висновки по розділу 5

1. Для вимірювань поляризаційного потенціалу приладом ВПП-М достатньо з'єднати його клеми з металом ПТ і електродами порівняння, тобто застосовувати традиційну (для інтенсивних обстежень) схему вимірювань але без обладнання установок катодного захисту спеціальними переривачами, що зменшує трудозатрати на підготовку та підвищує оперативність обстежень ПТ.

2. Розроблений прилад ВПП-М дає можливість контролювати катодну поляризацію та проводити пошук місць пошкодження ізоляції ПТ за відомими методами Пірсона і поперечного градієнта потенціалу. Для опрацювання і документування результатів вимірювань розроблено програмне забезпечення.

3. Створену апаратуру ВПП-М використано під час натурних випробувань на трасах підземних трубопроводів і експериментальних обстежень та контролю протикорозійного захисту підземних магістральних газопроводів Бібрського ЛВУМГ Управління МГ "Львівтрансгаз" ДК "Укртрансгаз" НАК «Нафтогаз України». З апаратурою та результатами її випробувань і використання ознайомлені представники газопромислового управління (ГПУ) «Львівгазвидобування» та Карпатського експертно-технічного центру Держпраці, які зацікавлені у її використанні (Додаток Ж).

4. Використання ВПП у комплексі з апаратурою безконтактних вимірювань струму БВС дає змогу у зоні дії установки катодного захисту за вимірами струму, потенціалів і координат з визначенням віддалі між вимірами визначати розподіл вздовж траси густини постійного складника струму катодного захисту та перехідного питомого опору ізоляції на різних ділянках ПТ для неруйнівного контролю стану протикорозійного захисту.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальну і практично важливу науковотехнічну задачу — розвинуто метод визначення поляризаційного потенціалу і створено прилади для контролю електрохімічного захисту та ізоляційного покриття для діагностичних обстежень стану протикорозійного захисту підземних трубопроводів і металевих конструкцій. При цьому отримано такі наукові результати.

1. Проведено огляд і аналіз наукової літератури та нормативно-технічної документації, встановлено недоліки відомих методів визначення поляризаційного потенціалу металевих споруд в електропровідному середовищі та обґрунтовано доцільність розроблення і використання нового методу і апаратури.

2. На основі розв'язку крайової задачі електродинаміки встановлено залежності ефективної ємності металевого циліндра з ізоляцією в електропровідному середовищі від електрофізичних параметрів структури і частоти поля, що дає змогу обґрунтовано вибирати частоту поля для визначення омічного складника потенціалу. Показано, що для розрахунків ємності металевої конструкції з ізоляційним покривом у слабопровідному середовищі за низьких частот не слід застосовувати формули, які грунтуються на рівняннях електростатичного поля зарядженого тіла, а треба використовувати розв'язки електродинамічної задачі з урахуванням залежностей розподілу поля від частоти.

3. На основі зіставлення реальних значень складових перехідного опору підземних трубопроводів встановлено, що застосування запропонованого методу визначення поляризаційного потенціалу за перехідного питомого опору ізоляційного покриву <10⁴ Ом⋅м² правомірне при використанні частот змінної напруги в діапазоні 2…2000 Гц.

4. Розроблено нову апаратуру для одночасних вимірювань постійних і змінних електричних напруг та поляризаційного потенціалу ВПП-М з модулем глобального позиціонування GPS, електронною пам'яттю та інтерфейсом, яка дає можливість

контролювати катодну поляризацію та проводити пошук місць пошкодження ізоляції ПТ за відомими методами Пірсона і поперечного градієнта потенціалу. Розроблено програмне забезпечення апаратури для опрацювання і документування результатів вимірювань.

5. Метрологічними дослідженнями підтверджено відповідність технічних характеристик ВПП-М нормативним вимогам ДСТУ 4219-2003 до апаратури для обстежень підземних трубопроводів; встановлено, що основна відносна похибка вимірювань потенціалів по чотирьох каналах не перевищує 1,2%.

6. У комплексі з апаратурою БВС-К прилад ВПП-М дає змогу за вимірами струму, потенціалів і координат з визначенням віддалі між точками вимірювань струму отримувати розподіли густини постійного складника струму установки катодного захисту та перехідного питомого опору ізоляції на різних ділянках підземних трубопроводів для неруйнівного контролю протикорозійного захисту.

7. Розроблену апаратуру ВПП-М використано під час натурних випробувань на трасах підземних трубопроводів і експериментальних обстежень та контролю протикорозійного захисту у підприємствах трубопровідного транспорту, що підтверджено актами і спільними науковими публікаціями.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Методы контроля и измерений при защите подземных сооружений от коррозии. / Н.П. Глазов, И.В. Стрижевский, А.М. Калашникова, Л.Ф. Щербакова, В.И. Глазков – М.: Недра, 1978. – 215 с.
- Защита металлических сооружений от подземной коррозии: Справочник / И.В. Стрижевский, А.М. Зиневич, К.К. Николький, В.И. Глазков, В.Г. Котик – 2-е изд. перераб. доп. – М.: Недра, 1981. – 293 с.
- Красноярский В.В. Коррозия и защита подземных металлических сооружений./ В.В. Красноярский, Л.Я. Цикерман – М.: Выс.шк., 1968. – 296 с.
- Бэкман В. Катодная защита от коррозии / В. Бэкман, В. Швенк / Пер. с нем. Под ред. И. В. Стрижевского. – М.: Металлургия, 1984. – 495 с.
- Электрохимическая защита трубопроводов от коррозии / В.Н. Остапенко, Л.Н. Ягупольская, В.В. Лукович, И.Н. Кохановский, Е.В. Егоров, Ю.А. Кузьменко, Ю.Г. Калькутин – Київ: Наукова думка, 1988. – 192 с.
- Защита подземных металлических сооружений от коррозии: Справ. / И.В. Стрижевский, А.Д. Белоголовский, В.И. Дмитриев, Н.А. Петров, Ю.В. Филиновский, Л.И. Фрейман. – М.: Стройиздат, 1990. – 303 с.
- ГОСТ 25812-83. Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии. М.: Изд-во стандартов, 1983. 50 с.; ГОСТ Р 51164-98, 1998. 42 с.
- Технічна експлуатація систем захисту від підземної корозії магістральних газопроводів / В.В. Розгонюк, Ю.П. Гужов, Ю.О. Кузьменко, В.А. Шишківський. Київ: Росток. 2000. 286 с.
- 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.

- ДСТУ 4219-2003. Трубопроводи сталеві магістральні. Загальні вимоги до захисту від корозії. – К.: Держстандарт України, 2003. – 73 с.
- Механіка руйнування та міцність матеріалів: Довідн. посібник / Під заг. ред. В.В. Панасюка. Том 11. Міцність і довговічність нафтогазових трубопроводів і резервуарів / Г.М. Никифорчин, С.Г. Поляков, В.А. Черватюк, І.В. Ориняк, З.В. Слободян, Р.М. Джала. Під ред. Г.М. Никифорчина. – Львів: "Сполом", 2009. – 501 с.
- Крижанівський Є.І. Корозійно-воднева деградація нафтових і газових трубопроводів та її запобігання: Науково-технічний посібник / Є.І. Крижанівський, Г.М. Никифорчин. Під ред.. В.В. Панасюка. У 3-х т. – Т. 1: Основи оцінювання деградації трубопроводів. – Івано-Франківськ – Львів: Вид-во ІФНТУНГ, 2011. – 457 с.
- Жибра Р. Теоретические и экспериментальные исследования коррозии подземных трубопроводов / Р. Жибра // Электрическая разведка в применении к вопросам исследования коррозии подземных трубопроводов. – М.: Изд-во ОНТИ НКТП СССР, 1937. – С. 58-101.
- 14. Колотыркин Я.М. Металл и коррозия. М.: Металлургия, 1985. 88 с.
- Улиг Г.Г. Коррозия и борьба с ней. Введение в коррозионную науку и технику / Г.Г. Улиг, Р.У. Реви: Пер. с. англ. / Ред. А. М. Сухотин. – Л.: Химия, 1989. –456 с.
- Бекман В. Катодная защита: Справочник / В. Бекман / Пер. с нем. Под ред.
 И.В. Стрижевского. М.: Металлургия, 1992. 176 с.
- 17. Глазов Н.П. Подземная коррозия трубопроводов, ее прогнозирование и диагностика // Кор. и защита: Обзор. М.: ИРЦ Газпром, 1994. 92 с.
- Антропов Л.И. Теоретическая электрохимия: Учеб. для хим.-технолог. спец. вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М: Высш. шк., 1984. – 519 с.
- Лукович В.В. Математические модели электрического поля в задачах электрохимической защиты трубопроводов: Дис...д-ра техн. наук в форме научного доклада: 05.13.16 / Ин-т проблем моделирования в энергетике. –

К., 1990. – 36 с.

- Забара В.Ф. Расчет и измерение потенциалов трубопроводов // В.Ф. Забара, А.С. Соколов, А.В. Забара. – Харків: Вид-во "Харків", 1992. – 131 с.
- Середницький А.Я. Протикорозійний захист магістральних трубопроводів та перспективи впровадження високоефективних ізоляційних покриттів / А.Я. Середницький, І.О. Ніронович // Нафт. і газ. пром-сть. – 1995. – №1. – С. 33-36.
- 22. Контроль розподілу струмів станцій катодного захисту в підземних БИТ-К. трубопроводах 3a допомогою апаратури / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, Р.І. Коваль. І.П. Хоменко // Нафтова i газова промисловість. - 1996.- № 2.- С. 47-48.
- Джала Р.М. Протикорозійний захист підземних споруд та методи неруйнівного контролю / Р.М. Джала // Фіз.-хім. механіка матеріалів. 1997. № 2. С. 128.
- 24. Джала Р.М. Перехідний опір, як основний показник стану захисних покрить підземних трубопроводів / Р.М. Джала // Протикорозійний захист підземних споруд та методи неруйнівного контролю КСП'97: Матеріали науково-практичного семінару. – Львів: ФМІ, 1997, с. 97-113.
- 25. Джала Р.М. Сучасний стан і проблеми контролю корозії підземних трубопроводів / Р.М. Джала // Проблеми корозії і протикорозійного захисту конструкційних матеріалів: IV Міжнар. конф.-вист. "Корозія '98" -Львів: ФМІ НАН України, 1998. – С. 411-414.
- 26. Максименко О.П. Безконтактне вимірювання координат і струмів інженерних комунікацій: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.11.05 / ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України. – Львів, 1998. – 17 с.
- 27. Стрілецький Ю.Й. Визначення змінної складової струму в підземному газопроводі за допомогою системи приймальних котушок / Ю.Й. Стрілецький, І.С. Кісіль // Методи та прилади контролю якості. 1998. № 2. С. 69-73.

- 28. Похмурський В.І. Умови і характер руйнування нафтогазопромислового обладнання / В.І. Похмурський, М.С. Хома // Протикорозійний захист трубопроводів і споруд та методи контролю "КТС-99": Матеріали 3-го науково-практичн. семінару. – Львів: ФМІ НАН України, 1999. – С. 9-24.
- Козлова І.О. Мікробна корозія підземних металевих споруд та їх захист / І.О. Козлова // Протикорозійний захист трубопроводів і споруд та методи контролю "КТС-99": Матеріали 3-го науково-практичн. семінару. – Львів: ФМІ НАН України, 1999. – С. 38-43.
- Черватюк В.А. Контроль та діагностика протикорозійних покрить трубопроводів, ємностей та елементів конструкцій / В.А. Черватюк, В.П. Стефан // Протикорозійний захист трубопроводів і споруд та методи контролю "КТС-99". – Львів: ФМІ, 1999. – С. 64-66.
- Неруйнівний контроль труб нафтового сортаменту / Карпаш О.М., Крижанівський Є.І., Криничний П.Я. та ін. – Івано-Франківськ: Факел, 2001. – 380 с.
- Себко В.П. Электромагнитные методы для бесконтактного измерения механических величин / В.П. Себко, Б.М. Горкунов, Р.И. Кириченко // Український метрологічний журнал. – Харків: ХДНВО, Вип. 3 – 2001. – С. 47-50.
- Нафтова і газова промисловість. Спец. випуск: 5 років НАК «Нафтогаз України». – К.: Держнафтогазпром, УНГА.- 2003. – 65 с.
- Яворський А.В. Контроль ізоляційного покриття підземних трубопроводів в умовах значних промислових електромагнітних завад / А.В. Яворський, І.С. Кісіль // Методи та прилади контролю якості. – 2003. – № 10. – С. 15-19.
- 35. Яворський А.В. Метрологічний аналіз пристрою БКІТ-2 для контролю стану ізоляційного покриття підземних нафтогазопроводів / А.В. Яворський, Л.А. Витвицька, І.С. Кісіль // Методи та прилади контролю якості. – 2004. – № 12. – С. 34-37.

- 36. Середницький Я. Сучасна протикорозійна ізоляція в трубопровідному транспорті./ Я. Середницький, Ю. Банахевич, А. Драгілєв / 2-а частина – Львів: ТзОВ "Сплайн", 2004.- 276 с.; 3-я частина – Львів-Київ, 2006.- 288 с.
- Основи моніторингу технологічних об'єктів нафтогазової галузі: Навч. посібник / Г.Н. Семенцов, М.М. Дранчук, О.В. Гутяк, Я.Р. Когуч, М.І. Когутяк, Я.В. Куровець – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2010. – 808 с.
- Ващишак І.Р. Розроблення інформаційно-вимірювальної системи для контролю підземних теплових мереж / І.Р. Ващишак, С.П. Ващишак, О.М. Карпаш // Методи та прилади контролю якості. 2011. № 27. С. 39-43.
- Цих В.С. Особливості реалізації методики контролю підземних нафтопроводів на території нафтоперекачувальних станцій / В.С. Цих, А.В. Яворський, С.П. Ващишак // Нафтогазова енергетика. – 2011. - №3. – С. 30-40.
- 40. Нафтогазова галузь України: поступ і особистості / За ред. З.П. Осінчука. –
 К.: Вид. «Логос Україна», 2013. 328 с.
- 41. Джала Р.М. Аппаратура БИТ-К для коррозионных обследований подземных трубопроводов / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенец // Прогрессивные материалы, технологические процессы и оборудование для защиты металлов от коррозии.- Киев: Наук. думка, 1990. - С.85-87.
- 42. Розробка методології створення засобів електромагнітного та неруйнівного контролю корозійного стану трубопроводів // Звіт про НДР (заключний) / Керівник НДР Р.М. Джала / Автори: Р. Джала, Л. Дікмарова, Л. Мізюк. О. Вакульський, Б. Вербенець, П. Дуб, А. Лозинський, Г. Трохим, О. Сенюк, В. Корнієнко / № держреєстрації 0194U012977. Деп. УкрІНТЕІ, Інв. № 0297U005337. – Львів: ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України, 1996, – 215 с.
- 43. Застосування безконтактних вимірювань струмів для корозійних обстежень магістральних газопроводів / Р. Джала, Б. Вербенець, Ю. Банахевич,

О. Винник, Й. Зубик, Ю. Глущук, Р. Орловський, Р. Бабуняк, Р. Сукач, О. Сенюк // IV Міжнар. конф.-вист. "Корозія '98", – с. 494-496.

- 44. Джала Р.М. Метод безконтактних вимірювань струмів для контролю протикорозійного захисту підземних трубопроводів / Р.М. Джала // Фізикохімічна механіка матеріалів. – 1999. – Т.35, № 3. – С. 105-112.
- 45. Контроль ізоляції підземних трубопроводів за заниканням струму / Р. Джала, Л. Дикмарова, Б. Вербенець, О. Сенюк, Ю. Банахевич, Р. Коваль, О. Винник, О. Балашов, О. Євтухов, В. Цибульский // Проблеми корозії і протикорозійного захисту конструкційних матеріалів: Спецвип. журн. "Фіз.-хім. механіка матеріалів". 2000 Т.2. С.633-638.
- 46. Джала Р.М. Контроль корозії підземних трубопроводів безконтактним методом / Р.М. Джала // Відбір і обробка інформації. 2001. Вип.15(91). – С. 142-153
- 47. Засоби визначення параметрів захисту від корозії підземних споруд / Р. Джала, Б. Вербенець, О. Балашов, П. Натина, С. Сухорський // Фіз.-хім. механіка матеріалів, 2002.– Спец. вип. № 3.– Т.2. С. 768-772.
- Інтегральний, диференціальний і локальний контроль ізоляційних покрить підземних трубопроводів / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, О.Й. Винник, С.Ф. Савула, О.І. Сенюк // 4-а Нац. н.-т. конф. і виставка "Неруйнівний контроль та технічна діагностика", – Київ, 2003 р., – Матеріали конференції. – С. 277-281.
- 49. Прилади ОРТ, БІТ, ВП для контролю підземних трубопроводів. / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, О.Й. Винник, В.Р. Джала, С.Ф. Савула, О.І. Сенюк, О.М. Балашов, А.В. Драгілєв, С.О. Сухорський. // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів (Серія), вип.9: Зб.наук.праць.– Львів: ФМІ НАНУ, 2004. – С. 167-170.
- Dzhala R.M. Metod of contaktless currents measurement in diagnostics of pipelines corrosion / R.M. Dzhala // 2-nd International conference "Pipeline inspection" – Moscow: MSIA "Spectrum", 1991 – p. 277-280.

- 51. Джала Р.М. Методи і засоби електромагнітних обстежень захисту від корозії підземних трубопроводів / Дисертація ... докт. техн. наук: 05.11.16
 Інформаційно-вимірювальні системи. Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Львів, 2002. 365 с.
- 52. Вербенець Б.Я. Безконтактний метод і прилади для контролю протикорозійного захисту підземних трубопроводів / Дисертація ... канд. техн. наук: 05.11.13 – Прилади і методи контролю та визначення складу речовин – Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Львів, 2011. – 258 с.
- Barnes P.R. The magnetically inferred current attenuation method for pipeline coating evaluation / P.R. Barnes // 2-nd International conference "Pipeline inspection" – Moscow: MSIA "Spectrum", 1991. – C. 538-545.
- 54. Безконтактний метод і апаратура для оперативних обстежень підземних трубопроводів / Р.М. Джала, Л.П. Дикмарова, Б.Я. Вербенець, П.М. Хлипняч // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин: Зб. наукових статей – К.: IE3 ім. Є. О. Патона НАН України, 2006. – С. 57-61.
- 55. Кісіль І.С. Використання горизонтальної складової напруженості магнітного поля при визначенні параметрів пошкодженої ізоляції підземних трубопроводів / І.С. Кісіль, А.В. Яворський, Б.В. Костів // Методи та прилади контролю якості, № 14, 2005. – С. 70-73.
- 56. Методика та апаратура двочастотних вимірів для перевірки якості ізоляційного покриття трубопроводу у вологих грунтах та на водних переходах / М.А. Ткаленко, С.М. Юхимець, С.М. Мухлинін, В.І. Єременко, Д.А. Гірник // Технічна діагностика та неруйнівний контроль. – 2008. – № 1. – С. 19-23.
- 57. Мухлинін С.М. Вдосконалення методів та засобів контролю якості ізоляційного покриття трубопроводів, що знаходяться у вологих грунтах та під водою / Автореф. дис...канд. техн. наук: 05.11.13 – Прилади і методи

контролю та визначення складу речовин. – НТУ України «Київський політехнічний інститут», Київ, 2012. – 20 с.

- 58. Деклараційний патент на винахід UA 43130 А. G01R19/00, C23F13/00. Спосіб визначення поляризаційного потенціалу підземної споруди / Р.М. Джала № 2001031462; Заявлено 02.03.2001.– Опубл. 15.11.2001. Бюл.№ 10.
- 59. Патент 2350971 RU. МПК G01R19/00. Устройство для измерения составляющих потенциала (поляризационной и омической) подземного металлического сооружения в зонах действия установок катодной защиты с пульсирующим напряжением на выходе / А.Х. Валиев, А.К. Мочалов, К.К. Григорович, А.В. Предущенко, С.П. Степанов, А.Я. Капустин / Заявка: 2007145136/28 06.12.2007. Опубл. 27.03.2009.
- 60. Патент 95895 UA, МКП G01V 3/00, G01R19/00, C23F13/00. Пристрій для визначення розміщення та контролю протикорозійного захисту підземних трубопроводів / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець / ФМІ НАН України Заявка и 2014 08202 подано 21.07.2014. Опубліковано 12.01.2015, Бюл.№ 1.
- 61. Авторское свидетельство SU 832485 А. Устройство для измерения потенциала подземного металлического сооружения, поляризуемого пульсирующим током / К.Л. Шамшетдинов, В.А. Ловачев и др. / ВНИИСТ.– Опубл. 23.05.1981, Бюл.№19.
- 62. Patent 4823072 United States. G01R 27/20. Measurement of the polarized potential of buried pipeline having impressed current cathodic protection / Kenneth J. Walcott, Nell G. Thompson, George T. Ruck, Steven B. Helton / Application number: 43040. Date of publication of application: 18.04.1989.
- Патент 2229704 RU. МПК 7 G01N27/00, G01R19/00. Устройство для измерения потенциалов подземных трубопроводов / И.Г. Кулаков, А.И. Логвинов, А.А. Енин / Заявка: 2002128305/28, 21.10.2002. – Опубликовано 27.05.2004.
- 64. Patent 2006-257532 Japan. C23F 13/00. Method for measuring potential of

corrosion-prevented body by cathodic protection, device for measuring potential, cathodic protection method and device / Kodama Toshiaki, Kimura Shigenori, Mochizuki Noriyasu, Shinoda Yoshihisa / Applic.: 2005-080350. Date of publ.: 28.09.2006

- 65. Патент 2308702 RU. G01N17/02. Устройство измерения потенциалов электрохимической защиты / Е.В. Распопов, А.Р. Юнусов, В.Е. Балахонцев, Филиппов В. О. / Заявка: 2005104200/28, 16.02.2005. Опубл. 20.10.2007. Бюл 29.
- Патент 2353941 RU. МПК G01R27/20. Способ измерения поляризационного потенциала металлических подземных сооружений / П.С. Орлов, В.П. Гусев, Л.А. Голдобина / Заявка: 2006137911/28, 26.10.2006. Опубл. 27.04.2008.
- 67. Патент 2421737 RU. МПК G01R19/00, G01N17/02. Способ измерения потенциала подземного сооружения и устройство для его осуществления / Юдаков М. А., Анашкин А. А., Чулючкин В. В., Даянов Т. Р./ Заяв: 2010106940/28, 24.02.2010. Опубл. 20.06.2011.
- 68. Джала Р.М. Методи контролю потенціалу поляризації металу в електроліті / Р.М. Джала, М.І. Мельник // Матеріали 14-ої міжнародної науковотехнічної конференції «Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів» Леотест-2009, 16-21 лютого 2009 р., Славське Львівської обл. – С. 63-64.
- 69. Джала Р.М. Методи визначення потенціалу поляризації металевої споруди в електропровідному середовищі / Р.М. Джала, М.І. Мельник // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. Серія. Випуск 14. – 2009. – С. 125 – 128.
- 70. ИПП-1 «Менделеевец» измеритель потенциала поляризационного [Електронний ресурс] / Химсервис – Режим доступу: http://www.xumcepвuc.com/ipp-1-mendeleevets.html
- 71. Прима-2005 Универсальный регистратор [Електронний ресурс] / Кром -

Режим доступу: http://www.krom.ua/ru/production/differencepotential/8

- 72. MoData2 Messdatenerfassungsgerät Das KKS-Messgerät für Nach- und Intensivmessungen [Електронний ресурс] / Weilekes elektronik – Режим доступу: http://www.weilekes.de/mobile-datenerfassung/modata2.php
- 73. Газопровод как канал святи в системах телемеханики / В.Т. Сергованцев,
 В.А. Артемов, К.А. Конев и др. М.: Недра, 1984. 244 с.
- Дикмарова Л.П. Еквівалентні електричні схеми заміщення підземних трубопроводів / Л.П. Дикмарова // "Радіоелектроніка і телекомунікації", Вісник ДУ "Львівська політехніка", 1998, №352. – С. 26-30.
- 75. Джала Р.М. Визначення поляризаційного потенціалу металу в електропровідному середовищі /, Б.Я. Вербенець, М.І. Мельник // Відбір і обробка інформації. Вип. 38 (114), 2013 – С. 82-85.
- 76. Визначення параметрів подвійного електричного шару для моделювання корозії на межі метал-електроліт / Р.М. Джала, В.М. Юзевич, М.І. Мельник, О.П. Чабан // Комп'ютерні науки та інформаційні технології. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Львів: Вид. НУ "Львівська політехніка". 2011. № 694. С. 370-376.
- 77. Мельник М.І. Моделювання електричних параметрів межі металелектроліт / М.І. Мельник // Матеріали XXII відкритої науково-технічної конференції молодих науковців і спеціалістів Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України, м. Львів. – 2011. – С. 256-258.
- Мельник М.І. Методи контролю потенціалу поляризації підземних трубопроводів / М.І. Мельник // Матеріали XXI відкритої науковотехнічної конференції молодих науковців і спеціалістів Фізикомеханічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України, м. Львів. – 2009. – С. 351-353.
- 79. Джала Р.М. Вимірювання поляризаційного потенціалу з вилученням омічного складника / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, М.І. Мельник // Вісник Східноукр. національного ун-ту. – 2013. – № 14 (203). – С. 147-151.

- 80. Вербенець Б.Я. Вимірювання поляризаційного потенціалу для контролю протикорозійного захисту / Б.Я. Вербенець, Р.М. Джала, М.І. Мельник // Матеріали 16-ої міжнародної науково-технічної конференції «Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів» Леотест-2011, 21-26 лютого 2011 р., Славське Львівської обл. – С. 150-151.
- Джала Р.М. Контроль поляризаційного потенціалу підземних металевих споруд / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, М.І. Мельник // 7-а Національна науково-технічна конференція «Неруйнівний контроль та технічна діагностика – UkrNDT-2012»: Збірник доповідей / Київ: УТ НКТД, 2012. – С. 221-223.
- 82. Стрэттон Дж. А. Теория электромагнетизма. М. Л.: Гостехиздат, 1948. –
 539 с.
- 83. Шимони К. Теоретическая электротехника. М.: Мир, 1964, 775 с.
- Федоров Н.Н. Основы электродинамики: Учеб. Пособие для вузов. М.: Высш. Школа, 1980. – 399 с.
- 85. Джала Р.М. Вплив електрофізичних параметрів середовища на ємність металевого циліндра з ізоляцією / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, М.І. Мельник // Відбір і обробка інформації. 2016. 44(120). С. 12-16.
- 86. Никольский В.В. Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Наука, 1973. – 607 с.
- 87. Справочник по специальным функциям ... / Под ред. М. Абрамовица и И. Стиган / Переврд с англ. М.: Наука, 1979. 832 с.
- 88. Обчислення Бесселевих функцій за рекурентними співвідношеннями / Р.М. Джала, В.Р. Джала, М.І. Мельник, Н.В. Рогів // Обчислювальні методи і системи перетворення інформації: 2-а Науково-технічна конференція – Львів: ФМІ НАН України, 2012. – С. 23-24.
- 89. Гроднев И.И. Теория направляющих систем святи / И.И. Гроднев,
 В.О. Шварцман М.: Связь, 1978. 296 с.

- Вэнс Э.Ф. Влияние электромагнитных полей на экранированные кабели: Пер. с англ. / Под ред. Л.Д. Разумова. – М.: Радио и связь. 1082. – 120 с.
- Иоссель Ю.Я. Расчет электрической емкости / Ю.Я. Иоссель, Э.С. Кочанов,
 М.Г. Струнский 2-е изд. Л.: Энергоиздат, 1981. 288 с.
- Дослідження методів відбору і опрацювання електромагнітних сигналів для діагностування корозійного стану підземних трубопроводів// Звіт про НДР (заключний) / Керівник НДР Р.М. Джала / Автори: Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, М.І. Мельник / № держреєстрації 0110U000434. – Львів: ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2010. – 71 с.
- 93. Розробка методології і апаратури оперативних комплексних обстежень підземних трубопроводів// Звіт про НДР (заключний) / Керівник НДР Р.М. Джала / Автори: Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, Я.Є. Підгірняк, М.І. Мельник, О.М. Семенюк, О.О. Червінка / № держ. реєстрації 0110U004555. Львів: ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2012. 125 с.
- Дослідження і розробка електромагнітних методів, засобів відбору й 94. опрацювання інформації для контролю протикорозійного захисту магістральних трубопроводів// Звіт про НДР (заключний) / Керівник НДР Р.М. Джала / Автори: Р.М. Джала, В.М. Юзевич, І.Б. Івасів, Б.Я. Вербенець, Я.Є. Підгірняк, М.І. Мельник, О.М. Семенюк, О.О. Червінка, Л.Є. Червінка, О.А. Луцик / № держ. реєстрації 0111U002384. – Львів: ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2013. – 222 с.
- 95. Дослідження інформативних ознак електромагнітного поля біля поверхні металу з покриттям у провідному середовищі для діагностування корозії металоконструкцій // Звіт про НДР (заключний) / Керівник НДР Р.М. Джала / Автори: Р.М. Джала, В.М. Юзевич, І.Б. Івасів, Б.Я. Вербенець, Я.Є. Підгірняк, М.І. Мельник, О.М. Семенюк, О.О. Червінка, Л.Є. Червінка, О.А. Луцик / № держреєстрації 0114U004000. Львів: ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2016. 159 с.
- 96. Кеше Г. Коррозия металлов: Физико-химические принципы и актуальные

проблемы / Пер. с. нем. Под ред. Я. М. Колотыркина и В. В. Лосева. – М: Металлургия, 1984. – 400 с.

- 97. Миролюбов Е.Н. Об использовании потенциостатического метода в исследованиях электрохимической корозии / Е.Н. Миролюбов // В сб.: Новые методы исследования коррозии металлов – М.: Наука, 1973. – С. 9-16.
- 98. Михайловский Ю.Н. Применение импульсных методов поляризации для исследования процессов коррозии метал лов / Ю.Н. Михайловский // В сб.: Новые методы исследования коррозии металлов – М.: Наука, 1973. – С. 16-25.
- 99. Дерягина О.Г. Применение метода импульсной поляризации для изучения электрохимического поведения окислов и окисленной поверхности металла. / О.Г. Дерягина, Е.Н. Палеолог // В сб.: Новые методы исследования коррозии металлов – М.: Наука, 1973. – С. 46-51.
- Импульсная методика для исследования электрохимических процессов при высоких плотностях тока / В. Д. Кащеев, Н. С. Меркулова, А. Д. Давыдов, Б. Н. Кабанов // В сб.: Новые методы исследования коррозии металлов – М.: Наука, 1973. – С. 174-178.
- 101. Графов Б.М. Электрохимические цепи переменного тока / Б.М. Графов,
 Е.А. Укше М.: Наука, 1973. 128 с.
- 102. Байрачный Б.И. Переменно-токовый импеданс электродов с защитным покрытием / Б.И. Байрачный, Н.Д. Сахненко, М.В. Ведь // Защита металлов. – 1989. – Т.25, №2. – С. 322-324.
- 103. Лейкис Д.И. Применение импеданса к исследованию границы электродэлектролит / Д.И. Лейкис, Г.Л. Видович, Э.С. Севастьянов // Новые методы исследования коррозии металлов – М.: Наука, 1973. – С. 26-35.
- 104. Розенфельд И.Л. Электрохимические методы исследования защитных свойств полимерных покрытий / И.Л. Розенфельд, К.А. Жигалова, В.Н. Бурьяненко // Новые методы исследования коррозии металлов – М.: Наука, 1973. – С. 109-116.

- 105. Герасименко Ю.С. О соотношении между поляризационным сопротивлением при потенциале коррозии и скоростью коррозии при катодной защите / Ю.С. Герасименко, В.И. Сорокин // Защита металлов. – 1983. – Т. 19, №4. – С. 565-569.
- 106. Лавренко В.А. Определение коррозионной активности грунтов по отношению к стали методом поляризационного сопротивления / В.А. Лавренко, В.А. Швець // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 1992. – Т.28, №3. – С. 108-110.
- 107. Поляков С.Г. Применение электрохимических методов при коррозионном мониторинге трубопроводного транспорта / С.Г. Поляков // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 1998. №4. – С. 31-36.
- 108. Моделювання адгезійного шару на межі метал-діелектрик / Р.М. Джала, В.М. Юзевич, М.І. Мельник, О.П. Чабан // Комп'ютерні науки та інформаційні технології. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – Львів: Вид. НУ "Львівська політехніка". – 2011. – № 710. – С. 164-169.
- 109. Енергія активації деформованого металу поблизу вершини корозійної каверни / Р.М. Джала, В.М. Юзевич, М.І. Мельник, О.М. Семенюк // Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». Луцький Національний технічний університет. Луцьк: Вид. ЛНТУ. 2011. № 31. С. 114-119.
- 110. Система збалансованих показників для дослідження корозійних дефектів / Р.М. Джала, В.М. Юзевич, М.І. Мельник, О.М. Семенюк // Вимірювальна техніка та метрологія: Міжвідомчий науково-технічний збірник. – 2011. – № 72. – С. 130-134.
- 111. Джала Р.М. Термодинамічний підхід до контролю параметрів на границі сталь – водне середовище / Р.М. Джала, М.І. Мельник, В.М. Юзевич. // Матеріали 17-ої Міжнародної науково-технічої конференції ЛЕОТЕСТ-2012 "Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів ти виробів". – Славське Львівської обл., 20-25 лютого 2012 р. –

C. 132-134.

- 112. Розроблення математичної моделі для оцінювання ресурсу трубопроводу з корозійною тріщиною при навантажені / Р.М. Джала, С.Ф. Савула, В.М. Юзевич, М.І. Мельник // 7-а Міжнародна науково-технічна конференнція і виставка "Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання": Зб. матеріалів доповідей. Івано-Франківськ: НТУНГ, 25-28.11.2014 р. С. 314-317.
- 113. Джала Р.М. Моделювання адсорбційних зв'язків та їх впливу на інформативні параметри межі метал-електроліт / Р.М. Джала, В.М. Юзевич, М.І. Мельник // Комп'ютерні науки та інформаційні технології. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – Львів: Вид. НУ "Львівська політехніка". – 2015. – № 826. – С. 185–190.
- 114. Джала Р.М. Визначення характеристик електричного поля поверхневих шарів металів / Р.М. Джала, В.М. Юзевич, М.І. Мельник // Відбір і обробка інформації. – Вип. 43 (119), 2016 р. – С. 26-31.
- 115. Таблицы физических величин: Справочник. Под ред. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.
- 116. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела М.: Наука, 1978. 792 с.
- 117. Eustathopoulus N., Joud J.-C. Interfacial tension and adsortion of metallic systems // Current Topics in Material Science. – 1980. – V. 4. – P. 281–360.
- 118. Сопрунюк П.М. Діагностика матеріалів і середовищ. Енергетичні характеристики поверхневих шарів / П.М. Сопрунюк, В.М. Юзевич. Львів: ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України, вид-во "СПОЛОМ". 2005. 292 с.
- 119. Бернем К.Б. Средства контроля коррозии газопроводов / К.Б. Бернем // Нефть, газ и нефтехимия. Переводное издание журналов США. – 1987. – № 1. – С. 61-64.
- 120. Розробка методології і апаратури оперативних комплексних обстежень

підземних трубопроводів // Звіт про НДР (заключний) / Керівник НДР Р.М. Джала / Автори: Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, Я.Є. Підгірняк, М.І. Мельник, О.М. Семенюк, О.О. Червінка / № держреєстрації 0110U004555. – Львів: ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2012. – 125 с.

- 121. Розроблення виготовлення апаратури МГП лля ліагностичних та обстежень протикорозійного захисту підземних та контролю трубопроводів // Звіт про виконання НТ проекту (заключний) / Керівник HT проекту Р.М. Джала / Автори: Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, В.М. Юзевич, Я.Є. Підгірняк, М.І. Мельник, О.М. Семенюк, О.А. Луцик, О.О. Червінка. П.П. Луферчик Л.Є. Червінка, / N⁰ держреєстрації 0113U000926 – Львів: ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2013. – 83 с.
- 122. Розроблення системи i підготовка апаратурного забезпечення діагностичних обстежень підземних трубопроводів // Звіт про НДР (заключний) / Керівник НДР Р.М. Джала / Автори: Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, Я.Є. Підгірняк, М.І. Мельник, О.М. Семенюк, О.О. Червінка, Л.Є. Червінка, О.А. Луцик № / держреєстрації 0115U004004. – Львів: ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2015. – 151 с.
- 123. Розроблення технології захисту від корозії та корозійно-механічного руйнування металоконструкцій у сірководневих середовищах // Звіт про НДР (заключний) / Керівники НДР М.С. Хома, Р.М. Джала / Автори: М.С. Хома, Р.М. Джала, Г.В. Чумало, І.М. Антощак, В.М. Юзевич, Б.Я. Вербенець, Я.Є. Підгірняк, М.І. Мельник, М.Р. Чучман, В.Р. Івашків, О.М. Семенюк, С.А. Головей, О.А. Луцик, О.О. Червінка, Л.Є. Червінка, Б.М. Дацко, А.І. Дячун / № держреєстрації 0112U002777. Львів: ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2016. 262 с.
- 124. Вербенець Б.Я. "Безконтактний метод і прилади для контролю протикорозійного захисту підземних трубопроводів" / Автореферат дис. ... к.т.н. 05.11.13 – Львів: ФМІ ім. Г.В.Карпенка НАН України, 2011. – 20 с.
- 125. Технологія обстежень підземних трубопроводів з використанням
безконтактних вимірювань струмів / Р.М. Джала, С.Ф. Савула, Б.Я. Вербенець, О.Й. Винник, В.Р. Джала, М.І. Мельник, Т.І. Шевчук // Методи та прилади контролю якості, 2009. № 22 – С. 22-27.

- 126. Безконтактні міряння струмів для контролю протикорозійного захисту піземних трубопроводів / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, М.І. Мельник, Т.І. Шевчук // 6-й науково-практичний семінар «Забезпечення експлуатаційної надійності систем трубопровідного транспорту: Збірник доповідей науково-практичного семінару. – Київ, 10-11 червня 2009. – С. 97-98.
- 127. Пошук пошкоджень та оцінка стану ізоляції підземних трубопроводів / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, Т.І. Шевчук, М.І. Мельник // Пошкодження матеріалів під час експлуатації. методи його діагностування i прогнозування. Праці Міжнародної науково-технічної конференції, 21-24 Тернопіль вересня 2009 p. (Україна) / Відповідальний редактор В.Т.Трощенко – Тернопіль: ТДТУ ім. Івана Пулюя, 2009. – С. 179-182.
- 128. Електрохімічний захист підземного трубопроводу в зоні впливу ліній електропередач / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, О.Й. Винник, Ю.М. Гужов, С.Ф. Савула, М.І. Мельник // ФХММ Спецвипуск №8: Проблеми корозії та протикорозійного захисту металів. – 2010. Т.2. – С. 498- 503.
- 129. Джала Р.М. Пристрій контролю потенціалу поляризації / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, М.І. Мельник // Матеріали 15-ї міжнародної науковотехнічної конференції "Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів", 15-20 лютого 2010 р., Славське - С. 46.
- 130. Пошуково-вимірювальна система для моніторингу підземних трубопроводів / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, Т.І. Шевчук, М.І. Мельник // 11-я МНПК "Современные информационные и электронные технологии", 24-28 мая 2010 г., Одеса – 1 с.
- 131. Безконтактний метод і прилади для обстежень підземних трубопроводів / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, М.І. Мельник // Актуальні питання співро-

бітництва України і КНР у сфері високих технологій: Матеріали VII Міжнар. н.-п. конференції. – К.: КиївЦНТЕІ, 2 червня 2010. – С. 154-158.

- 132. Джала Р.М. Діагностичні обстеження захисту від корозії підземних трубопроводів / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, М.І. Мельник // Міжнародна наукова конференція "Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах" (ВКДТС-2011), Вінниця, ВНТУ. – Тези доповіді. – С. 190.
- 133. Контроль протикорозійного захисту підземних трубопроводів безконтактним методом / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, О.Й. Винник, М.І. Мельник, Р.С. Савула // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ, 2011, № 4(41) – С. 21-25.
- 134. Джала Р.М. Контроль електрохімічного захисту підземних металевих споруд / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, М.І. Мельник // Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання / 6-а Міжнар. н.-т. конф.: Зб. тез доп. – Ів.-Франківськ, 29.11-02.12.2011 р. – С. 116-118.
- 135. Метод контролю перехідного опору захисного покриву ділянки підземного трубопроводу. / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, О.Й. Винник, В.Р. Джала, М.І. Мельник, Р.Ф. Савула // ФХММ. Спец.вип. № 9. Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів. 2012. Т.2. – С. 668-672.
- 136. Методологія і апаратура оперативних комплексних обстежень підземних трубопроводів / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, Я.Є. Підгірняк, М.І. Мельник, О.О. Червінка, // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструктцій, споруд та машин. – К.: IE3 ім. Є.О.Патона НАНУ – 2012. – С. 66-71.
- 137. Автоматизація пристрою для вимірювання поляризаційного потенціалу / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, С.С. Думич, М.І. Мельник // "Комп'ютерне моделювання та програмне забезпечення інформаційних систем і технологій": збірник праць II Всеукраїнської науково-практичної конф., Львів 30 травня – 1 червня 2013 р. – Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2013 – С. 97.

- 138. Мельник М.І. Пристрій для вимірювання поляризаційного потенціалу / М.І. Мельник // Відкрита науково-технічна конференція молодих науковців і спеціалістів Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України: Матеріали XXIII конференції КМН-2013. Секція "Проблеми корозійно-механічного руйнування, інженерія поверхні, діагностичні системи". 23 –25 жовтня 2013 м. Львів. – С. 320 –323.
- 139. Методи і засоби діагностичних обстежень підземних трубопроводів / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, М.І. Мельник, Т.І. Шевчук. / Методи та засоби діагностики і контролю технічного стану трубопровідних систем різного діаметру: Тези н.-т. семінару – Киїів: ВЦ КиївЕкспоПлаза, 16 жовтня 2013 р. – С. 57-65.
- 140. Апаратура для діагностичних обстежень і контролю протикорозійного захисту підземних трубопроводів / Р.М. Джала, С.Ф. Савула, Б.Я. Вербенець, М.І. Мельник // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції "Нафтогазова енергетика-2013": Тези доповідей. – Ів.-Франківськ, 7-11 жовтня 2013 р. – С. 247-248.
- 141. Джала Р.М. Пристрої діагностичних обстежень підземних трубопроводів / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, М.І. Мельник. // ІІІ міжнародна науковопрактична конференція "Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки". – Чернівці, 2013. – С. 67.
- 142. Діагностичні обстеження підземних трубопроводів / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, В.Р. Джала, М.І. Мельник, Т.І. Шевчук // The Improvement of the Quality, Reliability and Long Usage of Technical Systems and Technological Processes: XI International Conference Nvember 12-20, 2013. Eilat, Izrael. P.14-16.
- 143. Мельник М.І. Розробка засобів контролю електрохімічного захисту підземних металевих споруд / М.І. Мельник // Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання: Матеріали IV науково-

практичної конференції студентів і молодих учених.– м. Івано-Франківськ. – 2013. – С. 119-120.

- 144. Контроль протикорозійного захисту магістральних трубопроводів за безконтактними вимірами струму в умовах завад / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, М.І. Мельник, Р.Ф. Савула, О.М. Семенюк // Фіз.-хім. механіка матеріалів. Спец. вип. № 10. Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів. 2014. Т.2. – С. 539-544.
- 145. Джала Р.М. Вимірювач електричного поля катодного захисту / Р.М. Джала, Я.Є. Підгірняк, // трубопроводу М.І. Мельник "Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах": Матеріали XIII міжнародної науково-технічної конференції 6-12 червня 2014р. м. Затока: Одеська національна академія зв'язку ім. О.С.Попова. – Одеса-Хмельницький: XHУ, 2014. - C. 85-86.
- 146. Апаратура МГП для обстежень підземних трубопроводів / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, А.Б. Мицик, М.І. Мельник // 7-а Міжнародна науковотехнічна конференнція і виставка "Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання": Зб. матеріалів доповідей. – Івано-Франківськ: НТУНГ, 25-28.11.2014 р. – С. 317-321.
- 147. Пристрої та методи обстежень захованих комунікацій / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, М.І. Мельник, О.М. Семенюк // Тези. 4 міжнар. н.-п. конференція "Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки". – Чернівці, 23-25 жовтня 2014. – С.67.
- 148. Визначення місця та вимірювання глибини залягання і електричних потенціалів підземних трубопроводів / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, А.Б. Мицик, М.І. Мельник, О.М. Семенюк // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах: Матеріали XIV Міжнарод. н.-т. конференції. 5-10 червня 2015 р. – Одеса – С.87.

- 149. Інформаційна технологія діагностування підземних комунікацій безконтактним методом / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, В.Р. Джала, М.І. Мельник, О.М. Семенюк, Т.І. Шевчук: Тези допов. XV міжнародній конференції "Проблеми інформатики та моделювання ПІМ-2015", 14-18 вересеня 2015 р.– Одеса – Матеріали XV МК ПІМ-2015 – Х.: XHУ «ХПІ», 2015. С. 19.
- 150. Мельник М.І. Контроль протикорозійного захисту підземних металевих конструкцій в електропровідному середовищі / М.І. Мельник // Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання: Матеріали V науково-практичної конференції студентів і молодих учених.– м. Івано-Франківськ. – 2015. – С. 1
- 151. Мельник М.І. Контроль протикорозійного захисту підземного трубопроводу з використанням апаратури ВПП / М.І. Мельник, // Матеріали XXIV відкритої науково-технічної конференції молодих науковців і спеціалістів Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України, м. Львів. – 2015. – С. 256- 258.
- 152. Патент UA 95140 U. МПК G 01R 29/12. Корисна модель "Пристрій для вимірювання електричного поля в електроліті" / Р.М. Джала, Я.Є. Підгірняк, М.І. Мельник, О.М. Семенюк / ФМІ НАН України: Заявка и 2014 07390 Подано 01.07.2014 Опубл.10.12.2014, Бюл.№ 23.
- 153. Патент на корисну модель 102424. МПК G01R19/25, G01N17/02, C23F13/04 «Пристрій для вимірювань постійних і змінних електричних напруг та поляризаційного потенціалу» / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, М.І. Мельник / ФМІ НАН України. – Заявка и 201504831 подано 18.05.2015. – Опубліковано 26.10.2015, Бюл.№ 20.
- 154. Джала Р.М. Вимірювання електричних потенціалів для діагностування протикорозійного захисту металоконструкцій / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, М.І. Мельник // Фіз.-хім. механіка матеріалів. 2016. 52, № 1 С. 126-130.

- 155. Нові методи контролю корозії підземних трубопроводів за вимірами струмів і потенціалів / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, М.І. Мельник, А.Б. Мицик, Р.Ф. Савула, О.М. Семенюк // XII Міжнар. конф. Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів «Корозія -2016». – 14-15 червня 2016. Доповідь пленарна. – 8 с.
- 156. Джала Р.М. Нові методи і засоби контролю ПКЗ підземних трубопроводів за вимірами струмів і потенціалів / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, М.І. Мельник // VIII-а Національна науково-технічна конференція «Неруйнівний контроль та технічна діагностика – UkrNDT-2016»: Збірник доповідей / Київ: УТ НКТД, 2016– С. 236-239.
- 157. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 65449. Комп'ютерна програма "Програма опрацювання вимірів постійних і змінних електричних напруг та поляризаційного потенціалу» – Державна служба інтелектуальної власності України. Реєстр. 18.05.2016.
- 158. Электромагнитный метод коррозионного контроля подземных трубопроводов / Р.М. Джала, Л.П. Дикмарова, Л.Я. Мизюк, Б.Я. Вербенец // "Индустриализация электрохимической защиты магистральных трубопроводов и промышленных объектов": Сб. научных трудов. – М.: ВНИИСТ, 1989. – С. 47-51.
- 159. Мизюк Л.Я. Бесконтактный экспресс-контроль коррозионного состояния подземных трубопроводов / Л.Я. Мизюк, Б.Я. Вербенец // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 1993. – № 2. – С. 103-113.
- 160. Дмитриев В.И. Навигация и локація: Учебник для вузов/ В.И. Дмитриев,
 В.Л. Григорян, В.А. Катенин / Под ред. В.И. Дмитриева. М.: ИКЦ "Академкнига", 2004 – 471 с.
- 161. Gade A non-singular horizontal position representation / Gade, Kenneth // The Journal of Navigation Cambridge University Press – 2010 – 63(3) p. 395-417.
- 162. Патент 52293 Україна, МПК G 01 V 3/00, C 23 F 13/00. Пристрій для визначення розміщення та вимірювання потенціалів підземних

трубопроводів / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець; заявник і патентовлаяник Фізико-мех. інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України – № и 2010 00756; заявл. 26.01.2010; опубл. 25.08.2010. Бюл. № 16.

- 163. Патент на винахід 113784. МПК G01R19/25, G01N17/02, C23F13/04 «Пристрій для вимірювань постійних і змінних електричних напруг та поляризаційного потенціалу» / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, М.І. Мельник / ФМІ НАН України. – Заявка а 201504833 подано 18.05.2015. – Опубліковано 10.03.2017, Бюл.№ 5.
- 164. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю: Навчальний посібник
 / Є.Т. Володарський, В.В. Кухарчук, В.О. Поджаренко, Г.Б. Сердюк Вінниця: Велес, 2001. 219 с.
- 165. Швецкий Б.И. Электронные цифровые приборы. К.: Техника, 1991. –
 191 с.
- 166. Основи забезпечення якості в нафтогазовій інженерії: Навч.посібник / О.М. Карпаш, А.В. Яворський, М.О. Карпаш – м. Івано-Франківськ: Факел, 2008. – 436 с.
- 167. Дороживець М.М. Опрацювання результатів вимірювань: Навч. посібник.
 Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2007. 624 с.
- 168. Яцук В.О. Методи підвищення точності вимірювань: Підручник /
 В.О. Яцук, П.С. Малачківський Львів: Видавництво "Бескид Біт", 2008. –
 368 с.
- 169. ГОСТ 22261-94 Средства измерений электрических и магнитных величин. Общие технические условия. – Минск: Межгосударственый совет по стандартизации, метрологии и сертефикации, 1994. – 35 с.
- 170. ДСТУ 3215-95 Метрологічна атестація засобів вимірювальної техніки. –
 К.: Держстандарт України, 1995. 10 с.
- 171. Джала Р.М. Електричне поле підземного трубопроводу: похибки електрометрії / Р.М. Джала // Відбір і обробка інформації. 2002. Вип.

16(92). – C. 5-8.

- 172. Розвиток методів параметричного аналізу випадкових сигналів для діагностики об'єктів тривалої експлуатації: Звіт з НДР / І.М. Яворський, Р.М. Джала, ..., Б.Я. Вербенець, М.І. Мельник, Т.І. Шевчук. та ін. Розділ 7 Дослідження і розробка методів і засобів відбору сигналів та селекції даних для визначення параметрів підземних трубопроводів. – Львів: ФМІ НАНУ, 2009, № ДР 0107U004066. – С. 225-278.
- 173. Rurociągi dalekiego zasięgu / Witold Stanisław Michałowski, Stanisław Trzop.
 Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 1996, 608 s.

додатки

Національна Академія Наук України Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка

"3ATBER Директор Ф інституту 🕅 J B. НАН України зарчук \$ 506 " 05 " 11

Вимірювач постійних і змінних електричних напруг та поляризаційного потенціалу ВПП-М

Керівництво до експлуатації

Провідний інженер-метролог ФМІ НАН України,

Ю. М. Пугач

Науковий керівник, зав. відділу № 6 ФМІ, Р. М. Джала

Додаток А

д. т. н

Загальні вказівки

Дане керівництво до експлуатації приладу ВПП-М призначене для її вивчення і містить опис структури та принцип дії, технічні характеристики і відомості, які необхідні для забезпечення повного використання його технічних можливостей, а також відомості, що необхідні для правильної експлуатації.

Прилад ВПП-М за основними показниками відповідає вимогам ГОСТ 22261-82 «Средства измерения электрических и магнитных величин. Общие технические условия», ДСТУ 4219-2003 «Трубопроводи сталеві магістральні. Загальні вимоги до захисту від корозії».

Дане керівництво з експлуатації розроблене у відповідності з вимогами ГОСТ 2.601-95 «Експлуатационные документы».

Терміни, які використовуються в керівництві та їх визначення відповідають вимогам ДСТУ 2681-94 «Метрологія. Терміни та визначення».

До роботи з приладом ВПП-М допускається персонал, який ознайомлений з даним «Технічний опис і інструкція до експлуатації приладу ВПП-М», пройшов ознайомлення з способом проведення робіт та інструктаж з техніки безпеки.

ОПИС І РОБОТА ПРИЛАДУ ВПП-М

1 Призначення. Область використання.

1.1 Апаратура для вимірювань постійних і змінних електричних напруг та поляризаційного потенціалу (далі прилад ВПП-М) призначена для обстежень підземних металевих споруд (трубопроводів, кабелів, та інших металевих конструкцій). Місце вимірювань визначаються вбудованим модулем глобальної системи позиціонування (GPS).

ВПП-М можна використовувати для вимірювань електричних потенціалів металоконструкцій в електропровідному середовищі.

1.2 Прилад ВПП-М вимірює постійну і змінну електричні напруги між металевою конструкцією і електродом порівняння (ЕП) та між двома електродами в електропровідному середовищі. За цими вимірами мікропроцесор приладу автоматично обчислює поляризаційний потенціал поверхні металу в електропровідному середовищі для контролю стану електрохімічного захисту металоконструкції від корозії.

1.3 Для визначення поляризаційного потенціалу прилад ВПП-М використовує змінну (з частотою 100 Гц) компоненту випрямленого пульсуючого струму установки катодного захисту (працює в зоні дії УКЗ). У випадку відсутності УКЗ використовують генератор змінного з частотою 100 Гц $\pm 0,1\%$ стабільного $\pm 0,1\%$ струму в діапазоні від 1 до 10 А при навантажені 4...100 Ом, підключений до заземлення і трубопроводу.

Електричні напруги міряють контактним способом з підключенням до металу об'єкту контролю (ОК) та з використанням мідносульфатних електродів порівняння.

1.4 Виміряні величини постійної і змінної напруг, обчислене значення поляризаційного потенціалу та координати і час записуються в енергонезалежну електронну пам'ять з присвоєнням чергового номеру виміру.

Записана в пам'яті інформація може зберігатись практично необмежений час. У режимі «Зчитування» записані в пам'ять дані по команді оператора виводяться на цифровий індикатор приладу.

Прилад ВПП-М можна підключити до зовнішніх пристроїв (персонального комп'ютера, ноутбука) по інтерфейсу RS-232 для передачі масиву вимірів з метою подальшого опрацювання та документування результатів вимірювань.

1.5 Прилад ВПП-М призначений для роботи в польових умовах (на трасах трубопроводів); живиться від вмонтованого акумулятора.

1.6 Прилад ВПП-М обслуговує і переносить вздовж траси один оператор. Електроди встановлює помічник оператора.

2 Технічні характеристики

2.1 Діапазон вимірювання постійних U і змінних V напруг:

- для каналу М-Ел.П U⁻_{mg}, U⁻_{mg} від 0,01 до 10 В;
- для каналу Ел.П–Д.Ел U⁻_{gg}, U⁻_{gg} від 0,001 до 1 В;

2.2 Робоча частота вимірювання змінних напруг 100 ± 0.5 Гц;

2.3 Послаблення завад промислової частоти, не менше 40 дБ;

2.4 Споживана потужність, не більше 0,75 ВА;

2.5 Кількість вимірів, що фіксуються у пам'яті 1000 вимірів;

2.6 Живлення приладу від акумуляторів $7,5 \pm 0,3$ В;

2.7 Час роботи від повного заряду акумулятора 12 год;

2.8 Габарити вимірювального блоку не більше 180*150*70 мм;

2.9 Маса вимірювального блоку (з акумуляторами) не більше 1,2 кг;

2.10 Робочі умови експлуатації:

- температура довкілля від 0°С до +30°С;
- відносна вологість повітря до 95% при температурі довкілля не більше +20 °C;
- атмосферний тиск (98±4) кПа.
- 2.11 Метрологічні характеристики:

- Основна похибки вимірювання напруг не більше 1,2%;
- Додаткова похибка вимірювання напруг від зміни температури довкілля від 0 С° до плюс 30 С° – не більша 0,5 основної похибки;
- Додаткова похибка вимірювання напруг при зміні напруги живлення від 7,2 до 7,8 В – не більша 0,5 основної похибки.

3 Комплект

3.1 Блок вимірювальний ВПП-М;

3.2 Комплект з'єднувальних проводів;

3.3 Керівництво до експлуатації;

3.4 Програмне забезпечення.

4 Опис апаратури

4.1 Прилад ВПП-М скомпонований в одному пластмасовому корпусі – вимірювальному блоку.

4.2 Блок електронний вимірювальний ВПП-М містить аналогову і цифрову частини, блок живлення та панель управління.

4.2.1 Функціональна блок-схема ВПП-М наведена на рис.1. Аналогова частина складається з чотирьох каналів.

4.2.2 Два вхідні канали підсилення постійної електричної напруги складаються з трьох каскадів: високоомного вхідного дільника 7, 9; підсилювача постійної напруги 11, 13; детектора 15,17,18,19.

4.2.3 Два вхідні канали підсилення та фільтрації змінної напруги складаються з чотирьох каскадів: підсилювача змінної напруги з високоомним входом 1, 3; смугового фільтра 5, 8; детектора 11, 13; випростовувача 15, 16;

4.2.4 У цифровій частині є:

- аналогово-цифровий перетворювач;

- блок управління;

- енергонезалежна пам'ять;

- блок відображення інформації;

- мікропроцесор (контролер)



1,2,3 – три вхідні клеми, 4,5 – два роздільні конденсатори, 6,8 – вхідні підсилювачі першого і другого каналів вимірювання змінних напруг, 7,9 – високоомні дільники першого і другого каналів вимірювання постійних напруг, 10,12 – смугові фільтри першого і другого каналів вимірювання змінної напруги, 11,13 – підсилювачі першого і другого каналів вимірювання постійних напруг, 14,16 – випрямлячі першого і другого каналів вимірювання змінних напруг, 15,17 – перший і другий детектори постійної напруги, 18,19 – перший і другий детектори постійної напруги, 18,19 – перший і другий детектори полярності, 20 – цифровий індикатор, 21 – аналого-цифровий перетворювач, 22 – модуль позиціонування, 23 – пам'ять, 24 – мікропроцесор, 25 – інтерфейс, 26 – клавіатура, 27 – блок живлення з літій-іонним акумулятором.

Рисунок 1 – Функціональна блок-схема вимірювача постійних і змінних електричних напруг для визначення поляризаційного потенціалу

ВПП-М

4.2.5 Блок живлення з перетворювачем напруги.

Блок живлення подає на схему приладу необхідні напруги і живиться від однієї акумуляторної батареї напругою 7,5 В. Для живлення операційних підсилювачів двополярною напругою ±15 В використовується перетворювач напруги, а для живлення мікроконтролера та цифрової частини використовується стабілізатор +5 В.

У режимі "ЗЧИТУВАННЯ" перетворювач напруги не використовується, цифрові мікросхеми каналу відтворення працюють від стабілізатора +5 В.

Монтаж електричних схем виконано на друкованих платах. Усі каскади приладу виконані на мікропотужних операційних підсилювачах, що забезпечують мале енергоспоживання і стабільність роботи в польових умовах.

4.3 Конструкція і елементи управління.

На передній панелі вимірювального блоку ВПП-М розміщені (рис.2):



Рисунок 2 – Панель управління приладу ВПП-М

Елементи управління

- 1 гніздо для підключення до електроду порівняння;
- 2 гніздо для підключення до допоміжного електроду;
- 3 гніздо для підключення до металу підземного трубопроводу;
- 4 кнопка "ВКЛ" для включення приладу;
- 5 кнопка "ВИКЛ" для виключення приладу;

6 – кнопка "ВИМІР ЗЧИТУВ" для переключення режиму роботи "вимірювання" або "зчитування";

7 – кнопка "ЗАПИС ПК" для запису даних вимірювання в пам'ять приладу в режимі "ВИМІР" та передачі даних на комп'ютер в режимі "ЗЧИТУВ";

8 – кнопка "ПОЧАТОК СТЕРТИ ПАМ'ЯТЬ" для переходу на перший записаний номер виміру в режимі "ЗЧИТУВ" та видалення всіх записаних даних в режимі "ВИМІР";

9 – кнопка "НАЗАД ВИДАЛИТИ ВИМІР" для переходу на попередній записаний номер виміру в режимі "ЗЧИТУВ" та видалення останнього записаного виміру в режимі "ВИМІР";

10 – кнопка "ВПЕРЕД GPS" для переходу на наступний записаний номер виміру в режимі "ЗЧИТУВ" та виведення на індикатор даних приймача GPS в режимі "ВИМІР";

11 – кнопка "КІНЕЦЬ" для переходу на останній записаний номер виміру;

12 - кнопка включення підсвітки індикатора;

Індикатори рідкокристалічного цифрового дисплею

- 13 "S" постійна і змінна напруги між ЕП та допоміжним електродом;
- 14 "М" постійна і змінна напруги між ЕП та металом трубопроводу;
- 15 значення постійних напруг;
- 16 значення змінних напруг;
- 17 "Р" значення поляризаційного потенціалу;
- 18 порядковий номер виміру;
- 19 "R" значення омічного складника;
- 20 наявність сигналу GPS ("V" відсутній, "А" активний);
- 21 стан заряду акумулятора;

ВПП-М скомпонований у пластиковому корпусі з автономним живленням (рис. 3). У корпусі розміщені плати підсилювачів постійних напруг двох каналів, плати підсилювачів змінних напруг двох каналів, плата управління з мікроконтролером, блок живлення та акумуляторна батарея.



Рисунок 3 – Вимірювач постійних і змінних електричних напруг та поляризаційного потенціалу ВПП-М

5 Принцип дії ВПП-М

5.1 Метод визначення поляризаційного потенціалу полягає у вимірюванні різниці потенціалів і змінної напруги "метал-земля" та вилученні омічної складової з врахуванням коефіцієнта гармоніки, визначеного шляхом міряння змінної та постійної напруг "земля-земля".

Вимірюють постійну різницю потенціалів U_{mg}^- і змінну напругу U_{mg}^- між підземним трубопроводом і розміщеним у середовищі ЕП та аналогічно – U_{gg}^- і U_{gg}^- між ЕП і допоміжним електродом. За цими вимірами мікропроцесор розраховує поляризаційний потенціал за формулою

$$U_{p} = U_{mg}^{-} - U_{mg}^{\sim} \cdot \frac{U_{gg}^{-}}{U_{gg}^{\sim}}$$

Відношення U_{gg}^{-}/U_{gg}^{-} є виміряний коефіцієнт гармоніки.

5.2 Аналогова частина апаратури працює наступним чином:

5.2.1 Постійна напруга з електродів порівняння подається на два вхідні канали підсилення постійної електричної напруги:

 перший каскад – підсилювач постійного потенціалу виконаний на прецизійному підсилювачі з малим зміщенням вихідної напруги та високим вхідним опором (>10 МОм);

 другий каскад – визначає абсолютне значення вимірюваного сигналу незалежно від його полярності;

- третій каскад – визначає і передає на контролер дані про полярність вимірюваного сигналу у двійковому коді;

З виходу детектора оброблений сигнал подається на АЦП, значення виміряної постійної напруги відображається на цифровому індикаторі.

5.2.2 Змінна напруга з електродів порівняння подається на два вхідні канали підсилення та фільтрації змінної напруги:

- перший каскад – підсилювач змінної напруги з високим вхідним опором (>2 МОм);

другий каскад – смуговий фільтр забезпечує вимірювання сигналу на вибраній частоті;

- третій каскад – випрямляє двополярний змінний сигнал;

- четвертий каскад – згладжує випрямлений сигнал по амплітуді.

З виходу випростовувача оброблений сигнал подається на АЦП, значення виміряної змінної напруги відображається на цифровому індикаторі.

5.3 Цифрова частина апаратури працює наступним чином:

5.3.1 На АЦП цифрової частини подаються аналогові сигнали з каналів підсилення для перетворення у цифрову форму.

5.3.2 Блок управління керує роботою пристрою вводу-виводу інформації, роботою пам'яті і блоку відображення інформації відповідно у режимах запису і відтворення.

5.3.3 Енергонезалежна пам'ять вміщує до 1000 вимірів, що достатньо для роботи в польових умовах.

5.3.4 Контролер виконує функції аналого-цифрового перетворення (АЦП) по чотирьох каналах, керує схемами вибірки-зберігання, проводить математичні операції з розрахунку поляризаційного потенціалу, записує дані в пам'ять з

одночасним формуванням номера виміру, виводить інформацію на рідкокристалічний дисплей.

5.3.5 Запис інформації в пам'ять здійснюється автоматично після натискання кнопки "ЗАПИС ПК".

5.3.6 Передбачено вивід записаної в пам'ять інформації через інтерфейс у комп'ютер для подальшої обробки і документування.

5.4 Для полегшення роботи з приладом додатково введена схема автоматичного вибору діапазону вимірювань, що дозволяє обходитись без перемикача діапазонів.

5.5 У комірках пам'яті приладу автоматично фіксуються виміряні напруги, визначений поляризаційний потенціал та координати і час виміру.

5.6 Відтворення (зчитування) вмісту пам'яті здійснюються в порядку збільшення або зменшення номера вимірювання (вперед або назад).

5.7 При розряді акумуляторів нижче допустимого рівня, для недопущення виходу їх з ладу, спрацьовує схема автоматичного виключення приладу. При цьому вміст пам'яті зберігається. Для відновлення роботоздатності апаратури необхідно зарядити акумулятори.

5.8 Установки катодного захисту, які діють на магістральних трубопроводах, подають на ПТ випрямлений пульсуючий струм від електромережі. У струмі УКЗ крім постійної складової, яка поляризує трубопровід, є і змінні складові (гармоніки). У випадках, коли для поляризації використовують джерело постійного струму, для застосування нового способу контролю достатньо модулювати струм на виході джерела змінною складовою частотою 100 Гц.

5.9 Ділянка трубопроводу, яку контролюють, повинна бути забезпечена можливістю встановлення електричного контакту з металом труби. Ділянка трубопроводу має бути у зоні дії УКЗ або генератора струму.

6 Порядок підготовки і робота з ВПП-М

6.1 Перед початком роботи необхідно перевірити акумулятори. При напрузі живлення нижче 7,2 В необхідно зарядити акумулятори до номінальної ємності.

6.2 Натиснути кнопку "ВКЛ".

6.3 За допомогою кнопки "ВИМІР ЗЧИТУВ" вибрати режим роботи "ВИМІР" для вимірювань напруг.

6.4 Вимірювання постійних і змінних напруг із записом у пам'ять.

6.4.1 До гнізда М приладу ВПП-М підключаємо вивід до металу трубопроводу, до гнізда Ел.П підключаємо мідносульфатний електрод порівняння, розміщений на поверхні ґрунту над трубопроводом, до гнізда Д.Ел підключаємо допоміжний мідносульфатний електрод, розміщений на поверхні ґрунту на відстані порядку 2...6 значень глибин залягання трубопроводу (рис. 4).



1 – пункт вимірювання; ЕП - електрод порівняння; ДЕ - допоміжний електрод.

Рисунок 4 – Схема підключення ВПП-М до електродів і об'єкту контролю

6.4.2 Зчитати дані вимірювань з індикатора приладу. Запис в пам'ять здійснюється кнопкою "ЗАПИС ПК", операцію повторити для наступного вимірювання.

6.4.3 Результат останнього вимірювання можна стерти з пам'яті натисканням кнопки "НАЗАД ВИДАЛИТИ ВИМІР" режимі "ЗЧИТУВ".

6.5 Відтворення записаної інформації на індикаторі можна проводити безпосередньо на трасі, або в камеральних умовах за допомогою кнопки "ВИМІР ЗЧИТУВ" вибравши режим роботи "ЗЧИТУВ".

Перевід даних у комп'ютер здійснюється через інтерфейс спеціальною програмою.

6.6 Стан заряду акумулятора автоматично контролюється мікроконтролером з виводом стану на індикатор (21 на рис.2).

6.7 Повне вимкнення приладу здійснюється кнопкою "ВИКЛ".

7. Правила зберігання і транспортування

7.1 Прилад повинен зберігатись у сухому провітрюваному приміщенні в ящику при температурі оточуючого повітря від 0 до 30°С і відносній вологості до 80 % при температурі 25°С.

У приміщенні для зберігання не повинно бути пилу, парів кислот і лугів, агресивних газів та інших шкідливих домішок, що викликають корозію.

7.2 Прилад може транспортуватись у закритій упаковці при температурі від -5 до +40° С і відносній вологості до 95 % при температурі 25°С.

Температури нижчі -10°С можуть зіпсувати акумулятори і рідкокристалічні індикатори, які в такому разі необхідно замінити.

7.3 Перед зберіганням і транспортуванням зарядити акумулятори до номінальної ємності. При тривалому зберіганні акумулятори витягнути з приладу і зберігати окремо в зарядженому стані.

8. Повірка приладу ВПП-М

Даний розділ складений з урахуванням положень ДСТУ 3215-95 «Метрологічна атестація засобів вимірювальної техніки», ДСТУ 2708-99 «Повірка засобів вимірювальної техніки», ДСТУ 4219-2003. «Трубопроводи сталеві магістральні. Загальні вимоги до захисту від корозії».

8.1 Операції та засоби повірки

Під час проведення повірки повинні проводитись операції і використовуватися засоби повірки, що вказані в табл.8.1.

№ пункту розділу повірки	Назва операцій, які виконують при повірці	Допустимі значення похибок, або граничні значення параметрів	Засоби повірки
1	2	3	4
8.3.1	Зовнішній огляд		
8.3.2	Перевірка функціонування		
	Визначення метрологічних параметрів:		
8.3.3	 визначення основної похибки вимірювань напруг 4 каналів; 	1,2%	Г6-34 В3-38 Ч3-64
8.3.4	– визначення робочої частоти каналів змінних напруг;	100 ±0,2 Гц	P-35 F6-34 B3-38 H3-64 P-33
8.3.5	– визначення вхідного опору	не менше 10 МОм	Г6-34 В3-38 Ч3-64 Р-33

Таблиця 8.1- Перелік операцій, які виконують при повірці

8.2 Умови проведення повірки

8.2.1 При проведенні операцій повірки необхідно виконувати наступні умови:

- температура довкілля (20±5) °С;
- відносна вологість повітря (65±15)%
- атмосферний тиск (100±4) кПа ;

8.3 Проведення повірки

8.3.1 Зовнішній огляд

При проведені зовнішнього огляду необхідно перевірити:

- наявність видимих механічних пошкоджень;
- чистоту роз'ємів та клем;
- якість з'єднувальних кабелів.

8.3.2 Перевірка працездатності приладу ВПП-М

8.3.2.1 Включити живлення. На входи "М–Ел.П" і "Ел.П–Д.Ел" подати постійну напругу. Перевірити відповідність показів індикатора U_{mg}^{-} , U_{gg}^{-} значенням вхідних сигналів.

8.3.2.2 На входи "М–Ел.П" і "Ел.П–Д.Ел" подати змінну напругу. Перевірити відповідність показів індикатора $U_{mg}^{\tilde{}}$, $U_{gg}^{\tilde{}}$ значенням вхідних сигналів.

8.3.2.3 На входи "М–Ел.П" і "Ел.П–Д.Ел" подати змінну напругу з постійною складовою. Записати покази індикатора приладу ВПП-М. Розрахувати значення поляризаційного потенціалу за формулою

$$U_{p} = U_{mg}^{-} - U_{mg}^{-} \cdot \underbrace{U_{gg}^{-}}_{U_{gg}^{-}}$$

Зіставити розраховане значення U_p з показом індикатора.

8.3.2.4 Натиснути кнопку "ЗАПИС ПК" для запису даних у пам'ять.

8.3.2.5 Перевести прилад у режим "ЗЧИТУВ" (ВПП-М, КЕ, п.6.3.1). Перевірити достовірність записаних у пам'ять даних. Результати вимірювань занести в протокол.

8.3.3 Визначення основної похибки вимірювання напруг

8.3.3.1 Електронний блок ВПП-М переключити у режим "ВИМІР" і підключити два входи "М–Ел.П" і "Ел.П–Д.Ел" до виходу джерела постійної напруги U_i^- . Паралельно до цього ж виходу джерела постійної напруги підключити вольтметр постійної напруги U_{a}^- .

8.3.3.2 Електронний блок ВПП-М переключити у режим "ВИМІР" і підключити два входи "М–Ел.П" і "Ел.П–Д.Ел" (для вимірювань $U_{mg}^{\tilde{}}$ і $U_{gg}^{\tilde{}}$ відповідно) до виходу генератора $U_{i}^{\tilde{}}$. Паралельно до цього ж виходу генератора

підключити вольтметр змінної напруги $U_{et}^{\tilde{e}}$. Настроїти генератор на частоту 100 ± 0,5 Гц і контролювати її частотоміром.

8.3.3.3 Визначення основної похибки вимірювання напруги з частотою 100 Гц провести в чотирьох точках (m): 25, 50, 75, 100 % найбільшого значення діапазону. У кожній точці діапазону провести по десять вимірювань.

8.3.3.4 Обробіть результати спостережень. Результати вимірювання вважати задовільними, якщо значення виміряних напруг не будуть відрізнятися від дійсних значень більш ніж ±1,2%.

8.3.4 Визначення робочої частоти приладу ВПП-М f_r

8.3.4.1 Напругу на виході генератора підтримувати постійною для кожної частоти, контролюючи вольтметром генератора; частоту контролювати частотоміром.

8.3.4.2 Послідовно встановлюючи частоту змінної напруги з кроком 10 Гц в діапазоні 50÷150 Гц, провести по 3 вимірювання напруги в кожній точці діапазону 50÷150 Гц.

8.3.5 Визначення вхідного опору приладу ВПП-М

8.3.5.1 Використовують блок живлення, резистор R номіналом 10 МОм ± 1% та перемикач S.



Рисунок – 5 Схема перевірки вхідного опору приладу.

8.3.5.2 На виході блоку живлення встановити постійну напругу 1 В.

8.3.5.3 При верхньому положенні перемикача S зчитати покази вольтметрів постійної напруги приладу ВПП-М по обох каналах (*U*).

8.3.5.4 Встановити перемикач у нижнє положення і зчитати покази вольтметрів постійної напруги приладу ВПП-М по обох каналах (*U_a*).

8.3.5.5 Розрахувати вхідний опір кожного каналу за формулою:

$$R_{ex} = \frac{R}{\frac{U}{U_a} - 1}$$

8.3.6 Оформлення результатів повірки

Результати повірки записують у розділ «Періодична повірка основних нормативно-технічних характеристик» формуляра. За позитивними результа-тами повірки проводять запис про проведену повірку, яку завіряють підписом повірника.

На прилад ВПП-М, який не відповідає вимогам даної методики, видається повідомлення про її непридатність до використання.

8.3.7 Періодичність повірки

Прилад ВПП-М проходить повірку не рідше 1 разу в рік. Після ремонту апаратура повинна проходити повірку.

Додаток Б

Комп'ютерна програма «Програма опрацювання вимірів постійних і змінних електричних напруг та поляризаційного потенціалу»: Керівництво користувача / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, М.І. Мельник – Львів: ФМІ НАН України, 2015 р.

До початку роботи з комп'ютерною програмою «Програма опрацювання вимірів постійних і змінних електричних напруг та поляризаційного потенціалу» (скорочено «Reader VPP») слід вивчити опис та інструкцію.

В описі подані основні відомості, необхідні для ознайомлення з комп'ютерною програмою «Reader VPP»: призначення, системні вимоги та порядок роботи.

Зміст керівництва користувача комп'ютерної програми «Reader VPP»

1. Призначення і можливості «Reader VPP» п. 1.				
2. Системні вимоги	п. 2.1-2.6			
3. Порядок роботи.	п. 3.1-3.4			
3.1. Запуск програми.	п. 3.1.1-3.1.3			
3.2. Налаштування програми.	п. 3.2.1-3.2.6			
3.3. Зчитування даних з ВПП	п. 3.3.1-3.3.4			
3.4. Обробка даних.	п. 3.4.1-3.4.6			
4. Завершення роботи «Reader VPP».	п. 4.1-4.3			

1. Призначення і можливості програми «Reader VPP»

1.1. Програма «Reader VPP» призначена для ідентифікації підключення вимірювача постійних і змінних електричних напруг та поляризаційного потенціалу ВПП до інтерфейсу RS-232 ПК. Мова інтерфейсу: українська.

1.2. Програма «Reader VPP» дозволяє здійснювати прийом даних вимірювань проведених апаратурою ВПП, записаних у пам'яті апаратури. (номер вимірювання, вимірювані величини, координати та час), розпізнавання вимірів.

1.3. Програма «Reader VPP» забезпечує можливість обробки проведених вимірів та формування таблиці даних.

1.4. Для більш детальної обробки та документування «Reader VPP» дає змогу експортувати всі дані у табличний редактор Exel.

2. Системні вимоги

2.1. Процесор: Intel Pentium або AMD Athlon з частотою не менше 1 ГГц.

2.2. Оперативна пам'ять 256 МБ для 32-bit систем і 1 ГБ для 64-bit систем.

2.3. Відеоадаптер: Microsoft DirectX 9 з розширенням не менше 800х600.

2.4. Вільне місце на диску: 16 Мб.

2.5. Операційна система: XP, Vista, Windows 7/8/10 (32-bit & 64-bit).

2.6. Клавіатура і миша Microsoft чи сумісні вказівні пристрої.

3. Порядок роботи.

3.1. Запуск програми.

3.1.1 Для запуску програми «Reader VPP» необхідно з провідника Windows (чи будь якого іншого зручного файлового менеджера) запустити файл "Reader VPP.exe" за допомогою клавіші "Enter" чи подвійного клацання лівої кнопки миші. Після цього появиться стартове вікно програми, показане на рис.1.

3.1.2 Вікно програми умовно можна поділити на два блоки: файлова панель для керування роботою програми і блок для приймання та редагування отриманих даних.

3.1.3 Для отримання даних потрібно відкрити уже збережені дані за допомогою кнопки меню "Відкрити", або підключити апаратуру ВПП і зчитати з неї записані дані.



Рис. 1. Загальний вигляд стартового вікна програми «Reader VPP»

3.2. Налаштування програми

3.2.1 Для оптимізації прийому даних з апаратури ВПП передбачений пункт меню "Налаштування", показаний на рис.2.

3.2.2 У програмі «Reader VPP» передбачена можливість вибору потрібного СОМ порта. По замовчуванню вибрано СОМ1.

3.2.3 У програмі «Reader VPP» реалізовано передачу даних по інтерфейсу RS-232 зі швидкістю від 110 до 256000 б/с. По замовчуванню встановлена швидкість 9600 б/с; потрібно вибрати 4800 б/с. 3.2.4 Передбачено можливість передачі від 5 до 8 бітів даних. По замовчуванню вибрано 8 біт.

3.2.5 Для контролю точності передачі даних реалізовано парність передачі даних; по замовчуванню не контролюється.

3.2.6 Передбачено можливість вибору стопових бітів 1; 1,5 і 2; по замовчуванню стоїть 1 біт.

Отрима	ти Відкри	ти Дані	Зберегти	Експорт	налаштува Параметр	ння						
началь	ник прилад	/ \	/PP									
	ніть сюди за	голов	вок колонкі	4 для групув	ання по цьом	у стовпцю						
}	√ 01, 9	U	I2, V	V1, V	V2, V	Р, V потенціал	R, V	Широта	Довгот	а Висота, м	Дата	Час
					Нат	исніть тут, щ	об задати фі	Hanam	IVRAHI	414		
	15 -0	75	0,007	0,37	0,138	-0,74	0,019		ryban	110	کا لیک لیک	13:46:22
	14 -0	83	0,862	0,36	0,485	1,46	0,640	Порт з'єд	нання			13:38:08
	13 -0	84	0,843	0,36	0,483	1,46	0,628					13:37:22
	12 -0	79	0,855	0,32	0,485	1,35	0,564	Порт		COM1	-	13:36:17
	11 -0	84	0,844	0,24	0,49	1,25	0,413	Швилкіст	ть	4800	-	13:29:18
	10 -0	79	0,47	0,22	0	0		CLICITIZATION I		1000		13:27:02
	9 -0	84	0,002	0,23	0,014	0,81	0,033	Бітів дан	их	8		13:25:59
	8 -	D,8	0,002	0,24	0,013	0,77	0,037	Парність		None	1947 I	13:25:50
	7 -0	85	0,852	0,22	0,507	1,21	0,370					13:24:02
	6 -0	84	0,847	0,23	0,508	1,22	0,383	Стопови:	х бітів	1	- T	13:21:15
	5 -0	78	0,831	0,22	0,506	1,14	0,361	-				13:20:24
	4 -0	82	0,775	0,22	0,508	1,15	0,336		OK	Скасувати	1	13:18:36
	3 -0	83	0,778	0,23	0,508	1,18	0,352					13:18:28
	2 -0	85	0,772	0,21	0,507	1,16	0,320	L				13;18:21
								The second s			sector and rank	

Рис. 2. Вікно налаштувань програми «Reader VPP»

3.3. Зчитування даних з ВПП.

3.3.1 За допомогою інтерфейсу RS-232 з'єднати апаратуру ВПП з СОМ портом ПК. Виставити необхідні налаштування для коректної передачі даних.

3.3.2 На файловій панелі натиснути кнопку "Отримати"; при цьому кнопка буде підсвічена жовтим кольором.

3.3.3 Включити апаратуру ВПП і встановити режим зчитування. Натиснути і утримувати 3-5 сек. кнопку "ЗАПИС/GPS ПК" на панелі керування ВПП. Процес зчитування та передачі даних відображається біжучою стрічкою на індикаторі ВПП. 3.3.4 Дочекатись закінчення передачі даних. Якщо зчитування пройшло успішно, у блоці даних буде відображатись таблиця даних.

3.4. Обробка даних.

3.4.1 Зчитані дані автоматично формуються у таблицю, яка розміщена в блоці даних. Отримана таблиця містить стовпчики: номер виміру «№»; постійна різниця потенціалів "труба-земля" «U1, V»; постійна різниця потенціалів "земля-земля" «U2, V»; змінна напруга "труба-земля" «V1, V»; змінна напруга "земля-земля" «V2, V»; поляризаційний потенціал «P, V»; омічне падіння потенціалу в ґрунті «R, V»; «широта»; «довгота»; «висота, м»; день, місяць, рік «дата»; година, хвилина, секунда «час».

3.4.2 Для зручності обробки і документування передбачена можливість сортування даних по будь-якому стовпчику таблиці при натисканні лівої кнопки миші на назві стовпчика.

3.4.3 Під назвою кожного стовпчика розміщено рядок з фільтром для вибору потрібного діапазону даних.

4. Завершення роботи програми «Reader VPP»

4.1 Після завершення зчитування чи обробки даних для збереження отриманої інформації потрібно у файловій панелі натиснути кнопку "Зберегти", при цьому появиться вікно провідника, в якому потрібно вибрати папку та вказати ім'я файлу для зберігання.

4.2 При необхідності експортувати дані в табличний редактор Exel потрібно у файловій панелі натиснути кнопку "Експорт". При цьому появиться вікно провідника, в якому потрібно вибрати папку та вказати ім'я файлу для експортування.

4.3 По завершенні роботи з програмою «Reader VPP» натиснути червоний хрестик у правому верхньому куті вікна програми.

Додаток В

Національна Академія Наук України Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка

"3ATBER Директор Фізико иного інституту ім. Г.В. Картенк НАН Україн 3534506 Чазарчук 44 ,, 11 21 016 p.

Вимірювач постійних і змінних електричних напруг та поляризаційного потенціалу ВПП-М

Програма метрологічної атестації

Провідний інженер-метролог ФМІ НАН України

Ю. М. Пугач

Науковий керівник, зав. відділу № 6 ФМІ,

Д. Т. Н

Р. М. Джала

ВСТУП

Ця програма і методика метрологічної атестації поширюється на прилад ВПП-М і встановлює зміст та методику метрологічної атестації каналів вимірювань постійних і змінних електричних напруг для визначення поляризаційного потенціалу. Програма розроблена з врахуванням вимог ДСТУ 22261-94 «Средства измерения электрических и магнитных величин. Общие технические условия», ДСТУ 3215-95 «Метрологічна атестація засобів вимірювальної техніки», ДСТУ 4219-2003. «Трубопроводи сталеві магістральні. Загальні вимоги до захисту від корозії».

1. РОЗГЛЯД ТЕХНІЧНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ

1.1 Технічна документація на прилад ВПП-М повинна бути розглянута згідно вимог, які приведені в таблиці 1.

N⁰	Вимоги до розгляду технічної документації	Вказівки до методики розгляду		
Π/Π				
1	Перевірити комплектність технічної	Розглянути на відповідність ДСТУ 3215-95,		
	документації	ГОСТ 2.601-95		
2	Перевірити достатність об'єму метрологічних	Розглянути на відповідність ГОСТ 8.009-84,		
	характеристик і способів їх вираження	ДСТУ 4219-2003		
3	Проаналізувати умови визначення	Розглянути методику проведення		
	метрологічних характеристик та умови	досліджень метрологічних характеристик		
	проведення метрологічної атестації	приладу на відповідність КЕ		

Таблиця 1. Вимоги до розгляду технічної документації

1.2 На метрологічну атестацію розробник представляє наступну документацію:

- керівництво до експлуатації (КЕ);
- проект програми метрологічної атестації каналів вимірювань постійних і змінних електричних напруг для визначення поляризаційного потенціалу.

2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 При метрологічній атестації приладу ВПП-М в табл. 2.1 наведений перелік операцій, які слід виконати під час експериментальних досліджень метрологічних характеристик вимірювальних каналів.

T C 0 1	п ·	•		•	• •	•••
	LIGNO TIK		ΠΝΛΡΛΠΟΤΙΛΟ	П1П Ц9С	ΜΑΤΠΟΠΟΓΙΟΙΟΙ	3TECT31111
$1 a 0 \pi \pi \mu \Lambda \Delta . 1$	Tropolitik	операция лкі	проводлівся	під час		атсстаци
	1	1 '	1		1	

N⁰	Назва операцій, які виконують	Допустимі	Засоби	Пункт	MA	Повірка
п/п	при повірці	значення	повірки	ПМА		
		граничні				
		значення				
		параметрів				
1	2	3	4	5	6	7
1	Перевірка зовнішнього, вигляду			3.4	+	+
2	Перевірка працездатності			3.5	+	+
3	Встановлення числа			3.6	+	-
	досліджуваних					
	точок в діапазоні вимірювання					
4	Встановлення числа спостережень			3.7	+	-
	в досліджуваних точках діапазону					
5	вимірювання.					
5	визначення метрологічних					
	параметрів.					
	– визначення основної похибки		Г6-34			
	вимірювань постійних і змінних	±1,2%	B7-37	3.8.1	+	+
	напруг в діапазоні від 10 ⁻³ -10 В;	<u>,</u>	Ч3-64			
			P-33			

1	2	3	4	5	6	7
5	 визначення додаткової похибки вимірювань напруг від зміни температури довкілля від 0°С до плюс 30°С; 	не більше 0,5 основної похибки	Г6-34 В7-37 Ч3-64 Р-33 TV-1000	3.8.2	+	-
	 визначення додаткової похибки вимірювань напруг від зміни напруги живлення від 7,2 В до 7,8 В; 	не більше 0,5 основної похибки	Г6-34 В7-37 Ч3-64 Р-33	3.8.3	+	-
	 визначення робочої частоти каналів змінних напруг; 	100±0,2 Гц	Г6-34 В7-37 Ч3-64 Р-33	3.8.4	+	+
	– визначення вхідного опору	>10 МОм	Г6-34 В7-37 Ч3-64 Р-33	3.8.5	+	+
	– визначення споживаної потужності		Г6-34 В7-37 Ч3-64 Р-33	3.8.6	+	+
6	Оцінка анормальності результа-тів спостережень в кожній експериментальній точці			3.9	+	-
7	Статистична обробка результа-тів спостережень			3.10	+	+
8	Оформлення результатів			3.11	+	+

Продовження таблиці 2.1

2.2 Технічні характеристики зразкових і допоміжних засобів вимірювання які використовують при експериментальному дослідженні метрологічних характеристик приладу ВПП-М наведені в табл. 2.2.

№	Зразкові і допоміжні	
П.П	засоби вимірювань	Технічні характеристики
1	2	3
1	Частотомір елект-	частотомір вимірює:
	ронно-лічильний Ч3-	- по входу А-частоту і період сигналів синусоїдальної і імпульсної
	64	форми в діапазоні від 0,005 Гц до 150 МГц при рівні вхідного
		сигналу:
		- від 0,05 до 10 В для синусоїдальних сигналів;
		- від 0,15 до 10 В для сигналів імпульсної форми при тривалості
		импульсу не менше 3,5 нс;
		- по входу В – частоту синусогдальних сигналів в діапазоні від 100 до $100 MEy пру різнача сигнальних різ 0.01 до 1 В разівидараці різ$
		100 MI I При рівні вхідного сигналу від 0,01 до 1 В, в діапазоні від $1,000$ до 1500 МГи при радициці потукираті руїлиого сигнали рід 0.2
		1000 до 1500 мп ц при величині потужності вхідного сигналу від 0,2 ло 10 мВ τ .
3	Гецератор сигналів	$= \text{Піяпароц настот} = 0.1 \Gamma \text{u}_{-} 10 \text{M} \Gamma \text{u}_{-}$
5	спеціальної форми	- Основна похибка установки частоти - $+1\%$ (0 1Ги-100кГи) +2%
	Г6-34	$(0.001\Gamma_{\text{II}}-0.1\Gamma_{\text{II}} \mu 100\kappa\Gamma_{\text{II}}-1M\Gamma_{\text{II}}) \pm 5\% (1M\Gamma_{\text{II}}-10M\Gamma_{\text{II}})$
		- Вихілна напруга - 500мкВ-5В (50 Ом):
		- Коефіцієнт гармонік - 1% (20Гц-1кГц), 2% (1кГц-10кГц), 3% (10кГц-
		100кГц);
		- Коефіцієнт нелінійності сигналу трикутної форми - 2% (0,001Гц-
		0,1Гц и 1кГц-100кГц);
		- Тривалість фронту і зрізу прямокутного сигналу - 30нс;
		- Форма вихідних сигналів модуляційного генератора - синусоїдальна,
		трикутна, прямокутна;
		- Діапазон частот модуляційного генератора - 0,011 ц-20к1 ц;
		- Вихідна напруга модуляційного генератора - 0,5В-5В (600 Ом);
		- Вихідну змінну напругу можна зміщувати до постійної
		- Споживана потужність - $100B$ ·A;
		-1 a0apu1u - 490x1/9x480MM, - Maca - 17kp
Δ	Міціроцьтметр	- ліапазон вимівювання постійної напруги від 10 ⁻⁴ до 1000 В:
-	B7-37	- ліапазон вимірювання змінної напруги від 10 до 1000 В,
	2, 0,	ліапазоні частот від 20 Ги до 1000 МГи:
		- відносна похибка вимірювання змінної напруги:
		$\pm (1,0+0,2(Uk/Ux-1))$
		- відносна похибка вимірювання постійної напруги:
		$\pm (0,25+0,2(Uk/Ux-1))$
5	Магазин Р-33	Клас точності магазину Р33 0,2/6•10 ⁻⁶ . Межа допустимого відхилення
		дійсного значення опору магазину у відсотках від номінального,
		виміряного в нормальних умовах, визначається за формулою:
		$\delta = \pm [0,2 + 6 \cdot 10^{-0} (R \kappa / R - 1)]$ де Rк - найбільше значення опору
		магазину, Ом; R - номінальне значення включеного опору, Ом.

Таблиця 2.2 Технічні характеристики зразкових засобів вимірювання

Продовження таблиці 2.1

1	2	3
6	Кліматична камера TV-1000	Діапазон температур від -70 С до 90 ⁰ С
7	Джерело живлення	Вихідна напруга: 0 ~ 30V, точність установки 0.1V
	MPS-3010L-1	Вихідний струм: 0 ~ 10А, точність установки 0.01А
		Висока стабільність і малі пульсації (≤ 1.0mV)
		Малий вплив навантаження: $\leq 0.02\% \pm 5 \mathrm{mV}$
		Малий вплив напруги: $\leq 0.01\% \pm 5 \mathrm{mV}$
		Час встановлення: $\leq 100 \mu s$
		Режими роботи: стабілізація струму, напруги
		Габарити 155 х 375 х 255 мм
		Maca 10 кг

Примітка:

вказані в таблиці засоби повірки дозволено замінювати на аналогічні, при умові виміру останніми відповідних параметрів з необхідною точністю;

всі засоби повірки повинні бути придатними до експлуатації та мати діючі повірочні тавра або свідоцтва.

3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНОЇ АТЕСТАЦІЇ

3.1 Місце проведення атестації

3.1.1 Метрологічна атестація проводиться виготовлювачем у відділі з участю представника метрологічної служби.

3.2 Умови проведення метрологічної атестації

3.2.1 При проведенні операцій повірки необхідно забезпечити умови:

- температура довкілля (20±5) °С;
- відносна вологість повітря (65±15)% при температурі довкілля (20±5) °С;
- атмосферний тиск (100±4) кПа.
3.3 Вимоги техніки безпеки

3.3.1 При проведенні метрологічної атестації необхідно виконувати вимоги « Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів» та «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів».

3.4 Перевірка зовнішнього вигляду

3.4.1 Зовнішній огляд.

При проведені зовнішнього огляду необхідно перевірити:

- відсутність видимих механічних пошкоджень;

- чистоту роз'ємів та клем;

- якість з'єднувальних кабелів.

3.5 Перевірка працездатності приладу ВПП-М

3.5.1 Включити живлення. На входи "М-Ел.П" і "Ел.П-Д.Ел" подати постійну напругу за схемою рис. 1. Перевірити відповідність показів індикатора U_{me}, U_{ge} значенням вхідних сигналів.

3.5.2 На входи "М-Ел.П" і "Ел.П-Д.Ел" подати змінну напругу за схемою рис. 2. Перевірити відповідність показів індикатора U_{mg}^{\sim} , U_{gg}^{\sim} значенням вхідних сигналів.

3.5.3 На входи "М-Ел.П" і "Ел.П-Д.Ел" подати змінну напругу з постійною складовою. Записати покази індикатора приладу ВПП-М. Розрахувати значення поляризаційного потенціалу за формулою

$$U_{p} = U_{mg}^{-} - U_{mg}^{\sim} \cdot \frac{U_{gg}^{-}}{U_{gg}^{\sim}}$$

Зіставити розраховане значення U_p з показом індикатора.

3.5.4 Натиснути кнопку "ЗАПИС ПК" для запису даних у пам'ять.

3.5.5 Перевести прилад у режим "ЗЧИТУВАННЯ" (ВПП-М, КЕ, п.6.3.1). Перевірити достовірність записаних у пам'ять даних. Результати вимірювань занести в протокол.

3.6 Визначення кількості експериментальних точок *j*=1...*r* (в яких буде проводитися визначення характеристик)

Так як в технічному описі та інструкції до експлуатації відсутні вимоги щодо числа і розміщення експериментальних точок то вибирають досліджувані точки, які відповідають 25, 50, 75, 100% діапазону вимірювань засобу вимірювань і узгоджують з метрологічною службою інституту.

3.7 Визначення мінімальної кількості спостережень *i=1… n* в *j*-й повірочній точці діапазону (ГОСТ 8.508-84, п.п.2.9.5., 2.9.6)

Так як у технічному описі та інструкції до експлуатації приладу ВПП-М відсутні вимоги щодо кількості спостережень i=1... *n* в *j*-й точці дослідження, коли враховують тільки випадкову складову, то вибирають n=10 і узгоджують з метрологічною службою інституту.

3.8 Експериментальне визначення похибок

Під час експериментального визначення похибки вимірювання постійних та змінних напруг, робочої частоти та вхідного опору у відповідності з вимогами нормативно-технічної документації на методи і засоби перевірки вимірювальної техніки на входи контрольованих каналів подають зразкові значення вимірюваних величин. Результати вимірювання порівнюють з відповідними значеннями зразкового сигналу або показами зразкового приладу, в результаті чого визначають значення похибок.

Визначення метрологічних характеристик проводять з використанням статистичних методів обробки значень похибки. Порядок набору статистичних

даних і методи обробки повинні бути приведені в нормативно-технічній документації на методи і засоби перевірки конкретних приладів.

3.8.1 Визначення основної похибки вимірювання напруг

3.8.1.1 Дослідження постійної напруги провести по двох каналах за схемою вказаною на рис. 1. Прилад ВПП-М переключити у режим "ВИМІР" і підключити два входи "М–Ел.П" та "Ел.П–Д.Ел" (каналів для вимірювань U_{mg}^- і U_{gg}^- відповідно) до виходу джерела постійної напруги U_i^- . Паралельно до цього ж виходу джерела постійної напруги 2 постійної напруги U_{et}^- . Результати вимірювань занести в протокол.



1 – генератор Г6-34 у режимі джерела постійної напруги;
2 – мілівольтметр В3-38;
3 – досліджуваний прилад ВПП-М; *S*₁ – ключ; *R*₁, *R*₂ – дільники напруг.

Рисунок 1 – Схема досліджень постійних напруг

3.8.1.2 Вимірювання змінної напруги по двох каналах провести за схемою показаною на рис. 2. Електронний блок ВПП-М переключити у режим "ВИМІР" і підключити два входи "М–Ел.П" і "Ел.П–Д.Ел" (каналів для вимірювань U_{mg}^{\sim} і U_{gg}^{\sim} відповідно) до виходу генератора U_{i}^{\sim} . Паралельно до цього ж виходу генератора

підключити вольтметр змінної напруги $U_{et}^{\tilde{}}$. Настроїти генератор на частоту $100 \pm 0,5$ Гц і контролювати її частотоміром.



3 – досліджуваний прилад ВПП-М; 4 – генератор сигналів спеціальної форми Г6-34; 5 – частотомір електронно-лічильний Ч3-64; 6 – мілівольтметр В3-38; S₁ – ключ; R₁, R₂ – дільники напруг.

Рисунок 2 – Схема досліджень змінних напруг

3.8.1.3 Визначення основної похибки вимірювання напруги з частотою 100 Гц провести в чотирьох точках (m): 25, 50, 75, 100 % найбільшого значення діапазону. У кожній точці діапазону провести по десять вимірювань. Результати вимірювань занести в протокол.

3.8.1.4 Обробіть результати спостережень. Результати вимірювання вважати задовільними, якщо значення виміряних напруг не будуть відрізнятися від дійсних значень більш ніж ±1,2%. Результати вимірювання занести в протокол.

3.8.2 Визначення додаткової похибки вимірювання напруг при змінах температури оточуючого середовища в діапазоні робочих умов застосування

Для цього необхідно прилад ВПП-М витримати в кліматичній камері при температурі 0°С на протязі 1 години і, не виймаючи її з камери, провести виміри по

п. 3.8.1.

Результати вважати задовільними, якщо значення додаткової похибки не перевищує 0,5 значення основної похибки. Результати вимірювань занести в протокол.

Такі самі виміри провести при температурі плюс 30°С. Результати вважати задовільними, якщо значення додаткової похибки не перевищує 0,5 значення основної похибки. Результати вимірювань занести в протокол.

3.8.3 Визначення додаткової похибки вимірювання напруг при змінах напруги живлення в межах робочих умов застосування

Для цього необхідно подати на вхід приладу ВПП-М мінімальну напругу живлення 7,2 В, провести виміри по п.3.8.1.

Результати вважати задовільними, якщо значення додаткової похибки не перевищує 0,5 значення основної похибки. Результати вимірювань занести в протокол.

Такі самі виміри провести при максимальній напрузі живлення 7,8 В. Результати вважати задовільними, якщо значення додаткової похибки не перевищує 0,5 значення основної похибки. Результати вимірювань занести в протокол.

3.8.4 Визначення робочої частоти приладу ВПП-М f_r

3.8.4.1 Напругу на виході генератора підтримувати постійною для кожної частоти, контролюючи вольтметром генератора; частоту контролювати частотоміром (рис. 3).

3.8.4.2 Послідовно встановлюючи частоту змінної напруги з кроком 10 Гц в діапазоні 50÷150 Гц, провести по 3 вимірювання напруги в кожній точці діапазону 50÷150 Гц. Результати вимірювань занести в протокол.



2 – частотомір електронно-лічильний ЧЗ-64;
3 – досліджуваний прилад ВПП-М;
4 – генератор сигналів спеціальної форми Г6-34; *R*₁, *R*₂ – дільники напруг.

Рисунок 3 – Схема дослідження робочої частоти приладу ВПП-М

3.8.5 Визначення вхідного опору приладу ВПП-М

3.8.5.1 Перевірку вхідного опору вольтметра виконують за схемою, показаною на рис. 5. Використовують блок живлення, резистор R номіналом 10 MOM \pm 1% та перемикач S.



3 – досліджуваний прилад ВПП-М; 8 – блок живлення; S₁ – ключ; R₁ – резистор номіналом 10 МОм ±1%.

Рисунок 5 – Схема дослідження вхідного опору приладу ВПП-М

3.8.5.2 На виході блоку живлення встановити постійну напругу 1 В.

3.8.5.3 При верхньому положенні перемикача S зчитати покази вольтметрів постійної напруги приладу ВПП-М по обох каналах (U).

3.8.5.4 Встановити перемикач у нижнє положення і зчитати покази вольтметрів постійної напруги приладу ВПП-М по обох каналах (U_a).

3.8.5.5 Покази занести в таблицю 7.6 та розрахувати вхідний опір кожного каналу за формулою:

$$R_{ex} = \frac{R}{\frac{U}{U_a} - 1} \; .$$

3.8.5.6 Результати вимірювань занести в протокол.

3.8.6 Визначення споживаної потужності приладу ВПП-М

3.8.6.1 Відключити акумулятор приладу ВПП-М, а клеми живлення приладу підключити до блоку живлення 8 (рис.6) через резистор R_3 , дотримуючись полярності згідно рис. 6.

3.8.6.2 Встановити ключ S_1 в положення 2 і встановити на виході блоку живлення 7,5 В.

3.8.6.3 Включити прилад ВПП-М в режим "ВИМІР".

3.8.6.4 На виході блоку живлення за показом вольтметра 7 встановити напругу Un=7,2 В.

3.8.6.5 Встановити ключ S_I в положення 1. Виміряти напругу Ua на R_3 і розрахувати споживаний струм за формулою I=U/R. Розрахувати споживану потужність по формулі:

$$P_n = I_n \cdot U_m = \frac{V_7}{R_3} \cdot U_n;$$

3.8.6.6 Результати вимірювань занести в протокол.

3.8.6.7 На виході блоку живлення встановити постійну напругу Un=7,5 В. Провести виміри по пунктах 3.8.6.5–3.8.6.6.

3.8.6.7 На виході блоку живлення встановити постійну напругу 7,8 В. Провести виміри по пунктах 3.8.6.5–3.8.6.6.

3.8.6.8 Включити прилад ВПП-М в режим "ЗЧИТУВАННЯ". Провести виміри по пунктах 3.8.6.4–3.8.6.7.





3.9 Оцінка анормальності результатів спостережень в кожній експериментальній точці

У кожній *j*-й експериментальній точці оцінюють анормальність результатів спостережень Y_{yi} , при припущенні про те, що закон розподілу результатів спостережень у кожній експериментальній точці є нормальним. Виправлені результати позначають через Z_{ii} .

Оцінювання анормальності результату спостереження слід проводити в кожній експериментальній точці за таким алгоритмом:

• обчислити вибіркове середнє арифметичне значення результатів спостережень

 \overline{Y}_{j} за формулою

$$\overline{Y}_{j} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^{n} Y_{ji}$$
;

• обчислити вибіркове середнє квадратичне відхилення S_j за формулою

$$S_{j} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \times \sum_{i=1}^{n} (Y_{ji} - \overline{Y}_{j})^{2}};$$

• знайти відношення за формулою

$$U_{j\max} = \frac{|\max_{j} Y_{ji} - \overline{Y}_{j}|}{S_{j}}, U_{j\min} = \frac{|\min_{j} Y_{ji} - \overline{Y}_{j}|}{S_{j}};$$

значення $U_{j\max}, U_{j\min}$ порівняти з величиною h, взятою з табл.3.1 для даного обсягу вибірки n і прийнятої імовірності α . Якщо $U_{j\max} \ge h$

 $(U_{j\min} \ge h)$, то результат спостережень замінюють вибірковим середнім арифметичним значенням \overline{Y}_{j} інакше його не замінюють.

Обсяг вибірки Граничні значення *h* для імовірності *а* 0,100 0,075 0,050 0,025 n 3 1,15 1,15 1,15 1,15 4 1,42 1,48 1,44 1,46 5 1,60 1,64 1,67 1,72 6 1,73 1,77 1,89 1,82 7 1,83 1,88 1.94 2,02 8 1,91 1,96 2,03 2,13 9 1,98 2,04 2,11 2,21 2,29 10 2,03 2,10 2,18

Таблиця 3.1 Граничні значення h для $\alpha = P(U_{j \max} \ge h), \alpha = P(U_{j \min} \ge h), n \le 20$

3.10 Статистична обробка результатів спостережень

3.10.1 Визначення основної похибки вимірювання напруг

3.10.1.1 Визначити виміряні значення кожної з напруг U_{mg}^- , U_{gg}^- , U_{mg}^- і U_{gg}^- як середнє арифметичне результатів багаторазових вимірювань за формулою:

$$\overline{U}_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{im};$$

де U_{im} – значення напруги, виміряне приладом ВПП-М в т-й точці діапазону при проведенні і-го вимірювання; п – кількість вимірювань; т – номер точки по діапазону, в яких проводяться вимірювання.

3.10.1.2 Обчислити оцінку $\tilde{\Delta}U_{sm}$ систематичної складової абсолютної основної похибки вимірювання напруги:

$$\widetilde{\Delta}U_{sm} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (U_{im} - U_{etm});$$

де U_{etm} – задане значення напруги.

3.10.1.3 Визначити середньоквадратичне відхилення $s[\dot{\Delta}]U_m$ результату вимірювання:

$$s[\dot{\Delta}]U_m = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^n (U_{im} - \overline{U}_m)^2}$$

та його відносне значення

$$sU_m = \frac{s[\dot{\Delta}]U_m}{\overline{U}_m} * 100\%$$

3.10.1.4 Визначити оцінку $\tilde{\delta}[\Delta]U_m$ середньоквадратичного відхилення випадкової складової абсолютної основної похибки вимірювання напруги:

$$\widetilde{\delta}[\dot{\Delta}]U_m = \frac{s[\dot{\Delta}]U_m}{\sqrt{n}}$$

Результат обрахунків занести в табл. 13.

3.10.1.5 Визначити найбільше (по абсолютній величині) значення Δ_{\max} основної похибки:

$$\Delta_{\max m} = \widetilde{\Delta}U_{sm} + g_{\max}\sqrt{\left(\frac{\Delta_{et}}{g_{\min}}\right)^2 + \widetilde{\delta}^2[\dot{\Delta}]}U_m$$

де g_{max} – коефіцієнт, що залежить від заданої довірчої імовірності і закону розподілу густини імовірності. Для нормального закону розподілу при $P_g = 0.95$ $g_{\text{max}} = 2$.

 Δ_{et} – абсолютна похибка зразкової міри;

 g_{\min} – коефіцієнт, що залежить від закону розподілу густини імовірності похибки міри. Для рівномірного закону при $P_g = 0.99 \ g_{\min} = 2.3$.

3.10.1.6. Визначають максимальне значення δU_m відносної основної похибки вимірювання напруги:

$$\delta U_m = \frac{\Delta_{\max m}}{\overline{U}_m} * 100\%$$

Результат обрахунків занести в протокол.

3.10.2 Визначення додаткової похибки вимірювання напруг

3.10.2.1 Визначають виміряне значення напруги для нормальних умов \overline{U}_n і для крайніх точок діапазону змін впливаючої величини \overline{U}_1 або \overline{U}_2 :

$$\overline{U}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{ni}$$
$$\overline{U}_{1(2)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{i1(2)}$$

де \overline{U}_n – значення напруги для нормальних умов; $\overline{U}_{il(2)}$ – результат вимірювання напруги при найбільшому (найменшому) значенні впливаючої величини:

$$\Delta U_{d(1,2)} = \left| \overline{U}_n - \overline{U}_{1(2)} \right|$$

3.10.2.2 Відносна додаткова похибка δU_d вимірювання напруги від змін впливаючої величини:

$$\delta U_{d(1,2)} = \frac{\Delta U_d}{\overline{U}_u} \cdot 100\%$$

Результат обрахунків занести в протокол.

3.11 Оформлення результатів

3.11.1 Результати визначення характеристик похибки оформляють у вигляді протоколу.

Н. с., к. т. н.

- - - - - - М. І. Мель. - - - - - О. М. Семенюк

М. н. с.

Пров. інженер

протокол

метрологічної атестації

вимірювача постійних і змінних електричних напруг та поляризаційного потенціалу ВПП-М

м.Львів

21 грудня 2016 р.

1. Тип

Вимірювач постійних і змінних електричних напруг та поляризаційного потенціалу ВПП-М, зав. №, дата виготовлення 2015 р.

2. Мета випробувань

Проведення атестації вимірювача постійних і змінних електричних напруг та поляризаційного потенціалу ВПП-М з метою встановлення його придатності для практичного використання.

3. Місце випробувань

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

4. Операції досліджень

При метрологічній атестації необхідно:

- провести зовнішній огляд системи (п.3.4 ПМА);
- перевірити придатність системи і наявність з'єднувальних кабелів (п.3.5 ПМА);
- визначення основної похибки вимірювання напруг (п. 3.8.1 ПМА);

визначення додаткової похибки вимірювання напруг при змінах температури оточуючого середовища в діапазоні робочих умов застосування від 0°С до плюс 30°С (п. 3.8.2 ПМА);

• визначення додаткової похибки вимірювання напруг при змінах напруги живлення в межах робочих умов застосування від 7,2 В до 7,8 В (п.3.8.3 ПМА);

- визначення робочої частоти (п.3.8.4 ПМА);
- визначення вхідного опору (п.3.8.5 ПМА);

• визначення найбільшої споживаної потужності (п.3.8.6 ПМА).

5. Умови проведення досліджень (п.3.2 МПА):

- температура довкілля (20±5) °С;
- відносна вологість повітря (65±15)% при температурі довкілля (20±5) °С;
- атмосферний тиск (100±4)кПа.

6. Засоби повірки, що використовуються при атестації

№ п.п.	Назва приладу	Тип	Завод.№	Дата повірки
1	2	3	4	5
1	Частотомір електронно-лічильний обчислювальний	Ч3-64	3057	13.12.16
2	Генератор сигналів	Г6-34	0362	10.08.16
3	Мілівольтметр	B3-38	3281	20.10.16
4	Магазин опорів	P-33	009374	10.08.16
5	Кліматична камера	TV-1000	228450	
6	Джерело живлення	MPS-3010L-1	302228	

7. Результати вимірів

7.1 Результати перевірки працездатності приладу ВПП-М (п.3.5 ПМА) приведені в табл.7.1.

7.2 Результати визначення основної похибки вимірювання напруг (п.3.8.1 ПМА) приведені в табл.7.2.

7.3 Результати визначення додаткової похибки вимірювання напруг від зміни температури довкілля від 0°С до плюс 30°С (п.3.8.2 ПМА) приведені в табл. 7.3.

7.4 Результати визначення додаткової похибки вимірювання напруг при змінах напруги живлення (п.3.8.3 ПМА) приведені в табл. 7.4.

7.5 Результати визначення робочої частоти (п.3.8.4 ПМА) приведені в табл. 7.5.

7.6 Результати визначення вхідного опору (п.3.8.5 ПМА) приведені в табл. 7.6.

7.7 Результати визначення найбільшої споживаної потужності (п.3.8.6 ПМА) приведені в табл. 7.7.

Записані в пам'ять дані					Зчитані з пам'яті дані				
$U_{_{mg}}^{-}$	$U_{mg}^{}$	U^{-}_{gg}	$U_{_{gg}}$	U_p	$U_{_{mg}}^{-}$	U_{mg}	U^{-}_{gg}	U_{gg}	U_p
+8.91	+1.023	~5.50	~0.889	+2.58	+8.91	+1.023	~5.50	~0.889	+2.58
+5.50	+0.924	~6.02	~0.955	-0.32	+5.50	+0.924	~6.02	~0.955	-0.32
-7,96	-1,023	~3,04	~0.491	-1,63	-7,96	-1,023	~3,04	~0.491	-1,63
+2,81	-0,426	~1,49	~0.249	+5,36	+2,81	-0,426	~1,49	~0.249	+5,36

Таблиця 7.1 Результати перевірки працездатності приладу ВПП-М (п.3.5 ПМА).

Висновок: прилад ВПП-М вірно обчислю значення ПП та коректно записує і зчитує дані з пам'яті.

Таблиця 7.2 Результати визначення основної похибки

N⁰	канал	U_{etm}, V	\overline{U}_m, V	$\widetilde{\Delta} U_{sm}, V$	$s[\dot{\Delta}]U_m, V$	$\widetilde{\delta}[\dot{\Delta}]U_{_m},V$	$\Delta_{\max m}, V$	$\delta U_m, \%$
1	М-Ел.П	10,00	10,07	0,07	0,01	0,001	0,07	0,7
2	Ел.П–Д.Ел	1,000	1,010	0,010	0,001	0,0001	0,010	1,0
3	М-Ел.П	10,00	10,02	0,02	0,01	0,001	0,02	0,2
4	Ел.П–Д.Ел	1,000	0,999	0,001	0,001	0,0001	0,001	0,1
5	М-Ел.П	7,50	7,55	0,05	0,01	0,001	0,05	0,7
6	Ел.П–Д.Ел	0,750	0,756	0,006	0,001	0,0001	0,006	0,8
7	М-Ел.П	7,50	7,51	0,01	0,01	0,001	0,01	0,1
8	Ел.П–Д.Ел	0,750	0,751	0,001	0,001	0,0001	0,001	0,1
9	М-Ел.П	5,00	5,02	0,02	0,01	0,001	0,02	0,4
10	Ел.П–Д.Ел	0,500	0,505	0,005	0,001	0,0001	0,005	1,0
11	М-Ел.П	5,00	5,00	0,00	0,01	0,001	0,00	0,0
12	Ел.П–Д.Ел	0,500	0,499	0,001	0,001	0,0001	0,001	0,2
13	М-Ел.П	2,50	2,49	0,01	0,01	0,001	0,01	0,4
14	Ел.П–Д.Ел	0,250	0,248	0,002	0,001	0,0001	0,002	0,8
15	М-Ел.П	2,50	2,49	0,01	0,01	0,001	0,01	0,4
16	Ел.П–Д.Ел	0,250	0,247	0,003	0,001	0,0001	0,003	1,2

вимірювання напруг (п.3.8.1 ПМА)

Висновок: основна похибка визначення напруг відповідає вимогам ДСТУ.

N⁰	канал	t, °C	U_{etm}, V	\overline{U}_m, V	$\Delta U_{d(1,2)}, V$	$\delta U_m, \%$
1	М-Ел.П	0	10,00	10,03	0,03	0,3
2	Ел.П–Д.Ел	0	1,000	1,005	0,005	0,5
3	М-Ел.П	0	10,00	10,02	0,02	0,2
4	Ел.П–Д.Ел	0	1,000	1,003	0,003	0,3
5	М-Ел.П	30	10,00	10,04	0,04	0,4
6	Ел.П–Д.Ел	30	1,000	1,004	0,004	0,4
7	М-Ел.П	30	10,00	10,03	0,03	0,3
8	Ел.П–Д.Ел	30	1,000	0,996	0,004	0,4

Таблиця 7.3 Результати визначення додаткової похибки вимірювання напруг від зміни температури довкілля від 0°С до плюс 30°С (п.3.8.2 ПМА)

Висновок: додаткова похибка не перевищує 0,5 основної.

Таблиця 7.4 Результати визначення додаткової похибки вимірювання напруг при змінах напруги живлення (п.3.8.3 ПМА)

N⁰	канал	<i>U</i> , <i>V</i>	U_{etm}, V	\overline{U}_m, V	$\Delta U_{d(1,2)}, V$	$\delta U_m, \%$
1	М-Ел.П	7,2	10,00	10,01	0,01	0,1
2	Ел.П–Д.Ел	7,2	1,000	1,001	0,001	0,1
3	М-Ел.П	7,2	10,00	10,01	0,01	0,1
4	Ел.П–Д.Ел	7,2	1,000	1,002	0,002	0,2
5	М-Ел.П	7,8	10,00	10,01	0,01	0,1
6	Ел.П–Д.Ел	7,8	1,000	1,002	0,002	0,2
7	М-Ел.П	7,8	10,00	10,01	0,01	0,1
8	Ел.П–Д.Ел	7,8	1,000	0,998	0,002	0,2

Висновок: додаткова похибка не перевищує 0,5 основної.

N⁰	f,Гų	U_{img}^{\sim}, B	U_{igg}^{\sim}, B
1	50	0,20	0,023
2	60	0,33	0,036
3	70	0,52	0,054
4	80	0,88	0,090
5	90	1,87	0,192
6	95	3,55	0,356
7	100	8,06	0,816
8	105	3,72	0,396
9	110	2,05	0,216
10	120	1,16	0,122
11	130	0,80	0,083
12	140	0,61	0,063
13	150	0,51	0,052

Таблиця 7.5 Результати визначення робочої частоти (п.3.8.4 ПМА)



Рисунок 7.1 Результати визначення робочої частоти (п.3.8.4 ПМА)

Висновок: робоча частота приладу становить 100 Гц.

Канал	U, B	U_a, B	<i>R</i> _{вх} , МОм
М-Ел.П	1,0	0,503	10.1
Ел.П-Д.Ел	1,0	0,503	10.1

Таблиця 7.6 Результати визначення вхідного опору (п.3.8.5 ПМА)

Висновок: вхідний опір відповідає вимогам ДСТУ.

Таблиця 7.7 Результати визначення споживаної потужності (п.3.8.6 ПМА)

Режим роботи	U_{bat} , B	I, A	P, BA
вимірювання	7,5	0,10	0,750
зчитування	7,5	0,01	0,075

Висновок: прилад придатний для роботи в польових умовах.

Загальний підсумок: на основі результатів метрологічної атестації прилад ВПП-М вважати як такий, що відповідає вимогам ДСТУ щодо приладів для вимірювання потенціалів підземних трубопроводів та признати придатним до експлуатації.

Вимірювання проводили:

н. с., к. т. н.

Б. Я. Вербенець

М. І. Мельник

/____О. М. Семенюк

М. Н. С.

пров. інженер

Текст прошивки мікроконтролера РІС (фрагмент)

:06000008A150A16E12931 :08000800FF00030E8312031335 :10001000B4000A0EB500040EB6008A150A16122A9C :1000200000000000ED0B10280800EA08031D192845 :100030000800F93000000000000000000000008F :1000800008009308031D4528080009300000FF3EC2 :10009000031D46280000000930B45280800670850 :1000A000EF00EE010310EF0DEE0DEF0DEE0DEF077B :1000B0000318EE0AEF070318EE0A6830EF0703187B :1000C000EE0A00306E078A006808EE006F088200B2 :1000D0000308A000030EF0084307D2800308A0034 :1000E0000030EF0086307D2800308A000030EF00BD :1000F0008A307D280030EF009230EE070318EF0AB7 :100100006F088A006E088200063407340234033414 :100110000434053401340334053407340234043420 :1001200006340834313433343534373432343434EB :1001300036343834FA30EA001520FA30EA00152057 :10014000FA30EA001520FA30EA001520E30B9A286D :100150000800EE0183120317920193018316031323 :100160006308831203179000910183160313EE199D :100170000800641CC3288312031710089207031891 :10018000930A1108930783160313E40C03108312D8 :100190000317900D910D83160313EE0AB5288312F1 :1001A00003179001930194018316031363088312CC :1001B0000317910083160313640883120317920038 :1001C000101A080083160313651CEE288312031708 :1001D0001108930712080318120F940703108316CF :1001E0000313E60CE50C031083120317910D920D17 :1001F000900AE0288312031791019201940195015E :100200009301131A08000310940D950D8316031320 :10021000E80DE90D83120317910D920D8316031358 :100220006B08831203171202031D1C298316031384 :100230006A08831203171102031C30298316031363 :100240006A08831203179102831603136B080318BD :100250002C2983120317920383120317920214149A :10026000930A0129E7016608670203180800640081 :100270000130EA001520E70A3329FF30E700E801E2 :10028000E901EA01EB01EC01660A031D492901308D :10029000EA00EB08031D6D29EA08031D6229E60840 :1002A000031D55290130EB0062290A30ED001020B2 :1002B000680AE8006808643A031D62296603E600DC :1002C0006400E801203083120C058316E900E90878 :1002D000031949290230EB0049296B08023A031D32 :1002E00090290430831218058316E900E9080319E0 :1002F0007E2983121A088316EC009029023083129B :1003000018058316E900E90803198A2983121812CF :1003100018169029E70183121A0883166704E7006C :1003200083166708ED00EE01080083128C11831616 :10033000911583128C1D99298316E5080319A229AA :100340009116A32991121116111AA42983121308C8 :100350008316E600080083128C1183166508831249 :1003600093008C1DB1298316111FB9290130E600B5 :100370000800E6010800831203138C11831611157F

Додаток Д



ПРОТОКОЛ № 4

натурних випробувань на магістральному трубопроводі створеного зразка вимірювача постійних і змінних електричних напруг та визначення поляризаційного потенціалу ВПП-М

згідно Технічного завдання і Календарного плану виконання науково-технічної роботи по проекту Р2.6 програми «Ресурс» на 2015 р.

1. Дата проведення натурних випробувань: 10-11 вересня 2015 року.

- 2. Місце вимірювань: траса підземних магістральних газопроводів
 - 2.1. РГ «Липники-Львів» (Ду500) на ділянці Солонка Жирівка;
 - 2.2. МГ «Угерсько-Львів» (Ду1000) біля с. Деревач.
- 3. Мета дослідження: випробування роботи в натурних умовах вимірювача постійних і змінних електричних напруг та поляризаційного потенціалу ВПП-М на підземних трубопроводах.
- 4. Прилади та обладнання для досліджень:
 - 4.1. Вимірювач поляризаційного потенціалу ВПП (створений зразок).
 - 4.2. Підземні магістральні газопроводи (Ду500), (Ду1000).
 - 4.3. Діючі установки катодного захисту (УКЗ).
- Бихідні параметри установки катодного захисту УКЗ:
 УКЗ закрита. Доступу до показів вольтметра і амперметра УКЗ нема.
- 6. Хід випробування у польових умовах:
 - 6.1. Приєднання контакту від ПТ та ЕП і ДЕ до приладу згідно інструкції до використання ВПП-М;
 - 6.2. Вимірювання потенціалів із записом у пам'ять приладу ВПП-М;
- 7. Камеральна обробка
 - 7.1. Перевід результатів вимірювань з пам'яті ВПП-М у персональний комп'ютер.
 - 7.2. Аналіз і опрацювання результатів вимірювань.
- 8. Результати вимірювань подані у таблицях 1 і 2. Розміщення ділянок вимірювань на електронних картах показані на рис. 1–4.

9. Висновки за результатами натурних випробувань ВПП-М для контролю електрохімічного захисту від корозії підземного трубопроводу.

1. Прилад ВПП-М забезпечує вимірювання постійних і змінних електричних напруг «труба-земля» та «земля-земля» (поперечний градієнт) з використанням двох мідно-сульфатних електродів порівняння (ЕП і ДЕ) та визначення поляризаційного потенціалу підземного трубопроводу з показом вимірів на цифровому індикаторі.

2. Результати вимірювань автоматично фіксуються у пам'яті ВПП-М, що суттєво полегшує подальше їх опрацювання.

3. Координати місць вимірювання фіксуються модулем GPS, що суттєво спрощує процедуру документування.

4. За результатами проведених вимірювань можна зробити висновок про стан електрохімічного захисту контрольованих ділянок трубопроводів:

- на ділянці ПТ біля с. Солонка значення поляризаційного потенціалу на час вимірювань менше мінімального захисного потенціалу;

- на ділянці ПТ біля с. Деревач значення поляризаційного потенціалу відповідає нормативним вимогам щодо захисному потенціалу.

5. Створений прилад ВПП-М може бути використаний для контролю електрохімічного захисту підземних трубопроводів.

Випробування ВПП-М та опрацювання результатів вимірювань виконали:

Виконавці: н. с., к. т. н.

м. н. с.

інженер 1 категорії

Перевірив, погоджено: Керівник проекту, д-р техн. наук завідувач відділу № 6 ФМІ НАН України



Б.Я. Вербенець

М.І. Мельник

О.О. Червінка



Р.М. Джала

Натурні вимірювання потенціалів приладом ВПП-М на трасах підземних трубопроводів.

Табл.1. Експериментальні вимірювання електричних потенціалів приладом ВПП-М на трасі РГ «Липники-Персенківка» біля с. Солонка.

Пікет	U_{MG} , B	$V_{\scriptscriptstyle MG}$, B	U_{GG} , B	V_{GG} , B	U_p , B
від СКЗ до виходу ПТ над струмком ДЕ зліва	-0.63	0.22	-0.022	0.119	-0,59
там само ДЕ справа	-0.65	0.24	-0.021	0.121	-0.61

Табл.2. Експериментальні вимірювання електричних потенціалів приладом ВПП-М на трасі МГ «Угерсько-Львів» біля с. Деревач.

Пікет	U_{MG}, \mathbf{B}	$V_{\scriptscriptstyle MG},{ m B}$	U_{GG}, \mathbf{B}	V_{GG} , B	U_p , B
Біля СКЗ КВП-1 ДЕ зліва	-1.31	1.28	-0.033	0.117	-0.95
там само ДЕ справа	-1.25	1.32	-0.031	0.121	-0,94
КВП-2 ДЕ зліва	-1.05	0.81	-0.017	0.082	-0,88
там само ДЕ справа	-1.01	0.78	-0.013	0.086	-0,89

Розміщення на електронних картах ділянки випробувань приладу ВПП-М біля с. Солонка



Рис.1 Розміщення ділянки випробувань на фотографії з космосу



Рис.2 Розміщення ділянки випробувань на топографічній карті

Розміщення на електронних картах ділянки біля с. Деревач випробувань приладу ВПП-М.



Рис. З Розміщення ділянки випробувань на фотографії з космосу



Рис. 4 Розміщення ділянки випробувань на фотографії з космосу.

Додаток Е

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. DzhalaR.M. Measuring of Electric Potentials for the Diagnostics of Corrosion Protection of the Metal Structures / R.M. Dzhala, B.Ya.Verbenets', M.I. Melnyk // Materials Science. -2016. -Vol. 52, $N_{2} 1$. -P. 140-145.

2. Нові методи контролю корозії підземних трубопроводів за вимірами струмів і потенціалів / Р. Джала, Б. Вербенець, М. Мельник, А. Мицик, Р. Савула, О. Семенюк // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2016. – Т. 52, № 5.– С. 115–123.

3. Джала Р.М. Вплив електрофізичних параметрів середовища на ємність металевого циліндра з ізоляцією / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, М.І. Мельник // Відбір і обробка інформації. – 2016. – 44(120). – С. 12–16.

4. Джала Р.М. Визначення поляризаційного потенціалу металу в електропровідному середовищі / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, М.І. Мельник // Відбір і обробка інформації. – 2013. – 38 (114). – С. 82–85.

5. Джала Р.М. Вимірювання поляризаційного потенціалу з вилученням омічного складника / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, М.І. Мельник // Вісник Східно-українського національного університету. – 2013. – 14 (203). – С. 147–151.

6. Визначення параметрів подвійного електричного шару для моделювання корозії на межі метал-електроліт / Р.М. Джала, В.М. Юзевич, М.І. Мельник, О.П. Чабан // Комп'ютерні науки та інформаційні технології. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – Львів : Вид. НУ "Львівська політехніка", 2011. – № 694. – С. 370–376.

7. Патент на корисну модель UA 102424. МПК G01R19/25, G01N17/02, C23F13/04 "Пристрій для вимірювань постійних і змінних електричних напруг та поляризаційного потенціалу" / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, М.І. Мельник / ФМІ

НАН України. – Заявка и 201504831 подано 18.05.2015. – Опубліковано 26.10.2015, Бюл. № 20.

8. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 65449. Комп'ютерна програма "Програма опрацювання вимірів постійних і змінних електричних напруг та поляризаційного потенціалу" / Б.Я. Вербенець, Р.М. Джала, М.І. Мельник – Державна служба інтелектуальної власності України. – Реєстр. 18.05.2016.

9. Метод контролю перехідного опору захисного покриву ділянки підземного трубопроводу / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, О.Й. Винник, В.Р. Джала, М.І. Мельник, Р.Ф. Савула // Фіз.-хім. механіка матеріалів: спецвипуск № 9. Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів. Т.2, 2012. – С. 668–672.

10. Джала Р.М. Методи визначення потенціалу поляризації металу в електропровідному середовищі / Р.М. Джала, М.І. Мельник // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів (серія), вип. 14: зб.наук.праць. – Львів: ФМІ НАНУ, 2009. – С. 125–128.

11. Determination of parameters of corrosion protection of underground pipelines from non contact measurements of current / R.M. Dzhala, B.Ya.Verbenets', M.I. Melnyk, T.I. Shevchuk // MaterialsScience. – 2009. – Vol. 45, № 3. – P. 441–146.

12. Технологія обстежень підземних трубопроводів з використанням безконтактних вимірювань струмів / Р.М. Джала, С.Ф. Савула, Б.Я. Вербенець, О.Й. Винник, В.Р. Джала, М.І. Мельник, Т.І. Шевчук // Методи та прилади контролю якості. – 2009. – № 22. – С. 22–27.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

13. Мельник М. І. Контроль протикорозійного захисту підземного трубо проводу з використанням апаратури ВПП. // Матеріали XXIV відкритої науковотехнічної конференції молодих науковців і спеціалістів Фізико-меха-нічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України (Доповідач), Львів. – 2015. – С. 256–258. 14. Апаратура МГП для обстежень підземних трубопроводів / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, А.Б. Мицик, М.І. Мельник // 7-а Міжнародна науково-технічна конференнція і виставка "Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання": зб. матеріалів доп. (Співдоповідач) – Івано-Франківськ : НТУНГ, 2014. – С. 317–321.

15. Мельник М. І. Розробка засобів контролю електрохімічного захисту підземних металевих споруд. // Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання: Матеріали IV науково-практичної конференції студентів і молодих учених (Доповідач), Івано-Франківськ. – 2013. – С. 119–120.

16. Мельник М. І. Пристрій для вимірювання поляризаційного потенціалу // Відкрита науково-технічна конференція молодих науковців і спеціалістів Фізикомеханічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України: Матеріали XXIII конференції КМН-2013 (Доповідач). Львів. – 2013. – С. 320–323.

17. Методи і засоби діагностичних обстежень підземних трубопроводів / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, М.І. Мельник, Т.І. Шевчук. / Методи та засоби діагностики і контролю технічного стану трубопровідних систем різного діаметру : тези наук.-техн. Семінару (Доповідач). – Київ, 2013 – С. 57–65.

18. Автоматизація пристрою для вимірювання поляризаційного потенціалу / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, С.С. Думич, М.І. Мельник // Комп'ютерне моделювання та програмне забезпечення інформаційних систем і технологій: Тези доповідей ІІ Всеукраїнської науково-практичної конференції (Доповідач). – Львів, 2013 – С. 97.

19. Джала Р.М. Нові методи і засоби контролю ПКЗ підземних трубопроводів за вимірами струмів і потенціалів / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, М.І. Мельник // Збірник доповідей 8-ї Національної науково-технічної конференції "Неруйнівний контроль та технічна діагностика" (Співдоповідач) / Київ : УТ НКТД, 2016. – С. 236–239.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

20. Контроль протикорозійного захисту магістральних трубопроводів за безконтактними вимірами струму в умовах завад / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, М.І. Мельник, Р.Ф. Савула, О.М. Семенюк // Фіз.-хім. механіка матеріалів: спецвипуск № 10. Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів. Т.2, 2014. – С. 539–544.

21. Джала Р.М. Моделювання адсорбційних зв'язків та їх впливу на інформативні параметри межі метал-електроліт / Р.М. Джала, В.М. Юзевич, М.І. Мельник // Комп'ютерні науки та інформаційні технології (КНІТ). – Львів : Вид. НУ "Львівська політехніка", – 2015. – № 826. – С. 185–190

22. Електрохімічний захист підземного трубопроводу в зоні впливу ліній електропередач / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, О.Й. Винник, Ю.М. Гужов, С.Ф. Савула, М.І. Мельник // Фіз.-хім. механіка матеріалів: спецвипуск №8: Проблеми корозії та протикорозійного захисту металів, Т.2, 2010. – С. 498–503.

23. Методологія і апаратура оперативних комплексних обстежень підземних трубопроводів / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець, Я.Є. Підгірняк, М.І. Мельник, О.О. Червінка, // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин. – К. : ІЕЗ ім. Є.О.Патона НАНУ, 2012. – С. 66–71.

24. Патент на корисну модель UA 95140 U. МПК G 01R 29/12. "Пристрій для вимірювання електричного поля в електроліті" / Р.М. Джала, Я.Є. Підгірняк, М.І. Мельник, О.М. Семенюк / ФМІ НАН України: – Заявка и 2014 07390 – Подано 01.07.2014. – Опубл.10.12.2014, Бюл. № 23.

Додаток Ж

245



АКТ

використання методики і апаратури оперативних комплексних обстежень підземних трубопроводів

Акт складений про те, що методика комплексних діагностичних обстежень стану протикорозійного захисту підземних трубопроводів (ПТ) за безконтактними вимірами струму установки катодного захисту апаратурою БВС (з оцінками розподілу струму між гілками ПТ і з визначенням розподілу вздовж ПТ перехідного опору) та за контактними вимірами макетом приладу ВПП постійних і змінних електричних напруг «труба-земля» і «земля-земля» (з визначенням поляризаційного потенціалу ПТ) використовувалась у 2012 році під час натурних експериментальних обстежень стану протикорозійного захисту магістральних газопроводів Івацевичі-Долина (ІІ і ІІІ нитки, Ду 1220) та Липники-Персенківка (Ду 500 і Ду 700) Бібрського ЛВУМГ УМГ «Львівтрансгаз» ДК «Укртрансгаз» НАК «Нафтогаз України».

Створені у Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка НАН України зразки апаратури БВС та ВПП (виконавці: д.т.н. Р.М. Джала, к.т.н. Б.Я. Вербенець, М.І. Мельник) корисні для оперативних обстежень ПТ; особливо БВС на важкодоступних ділянках та за несправності конрольно-вимірювальних пунктів на трасах ПТ. Наші спеціалісти зацікавлені у подальшій співпраці, придбанні і використвнні нової апаратури на умовах договорів.

Головний інженер УМГ «Львівтрансгаз», кандидат технічних наук

С.Ф. Савула

П.М. Беззубяк 294-84-57

Ha No.

001293



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З ПИТАНЬ ПРАЦІ (Держпраці)

ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО "КАРПАТСЬКИЙ ЕКСПЕРТНО-ТЕХНІЧНИЙ ЦЕНТР ДЕРЖПРАЦІ" (ДП «Карпатський ЕТЦ»)

76007, Івано-Франківськ, вул. Максимовича, 15 т/факс 6-98-93 тех. відділ т.6-15-36, т. 6-09-14, бухгалтерія 6-27-00 р/р 26000060396034 в ІФФ Приватбанк , МФО 336677 КОД ЄДРПОУ 20538693 Інд. податк. номер 205386909157

«17 12 2015 p. № 415/01-08/15

А К Т впровадження і використання приладів для обстежень підземних трубопроводів

Державне підприємство «Карпатський експертно-технічний центр Держпраці» дійсно використовує створений у Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка Національної академії наук України і переданий нам по договору № № 1370 від 27.08.2015 р. портативний цифровий вимірювач електричних потенціалів **ВП-2** для контролю стану електрохімічного захисту (ЕХЗ) від корозії підземних трубопроводів (ПТ).

У 2015 році прилад ВП-2 використовували для міряння різниці потенціалів (постійної електричної напруги) метал-грунт або грунт-грунт (градієнту потенціалу) під час контролю ЕХЗ магістральних газопроводів «Богородчани-Долина» на переході через річки Лімниця і Чечва та МГ «ДУД-І» – р. Свіча. Прилад зручний в експлуатації, корисний, показує вірні результати вимірювань потенціалів.

Спеціалісти ДП «Карпатський ЕТЦ» ознайомлені з новими розробками апаратури для визначення місця та вимірювань глибини залягання і потенціалів МГП, безконтактних вимірювань струмів БВС-К, вимірювача постійних і змінних електричних напруг і поляризаційного потенціалу ВПП-М, які обладнані модулем визначення координат і часу (GPS) та електронною пам'яттю з інтерфейсом, що дає змогу автоматично передавати масиви даних вимірів у комп'ютер для подальшого опрацювання і документування.

Вважаємо названі розробки ФМІ НАН України (авторів д. т. н. Р.М. Джала, к. т. н. Б.Я. Вербенець, М.І. Мельник) актуальними і практично важливими для обстежень ПТ і пов'язаних з ними металоконструкцій та зацікавлені у подальшій співпраці з ФМІ, придбанні і використанні нової апаратури на умовах договорів.

Директор ДП "Карпатський Е О. Л. Александрович Я. Д. Стеблинський Експерт технічний з промислової безпеки ДЕРЖА Т.В. Яценко Фахівець із стандартизації сертифікації та якості

Публічне акціонерне товариство " УКРТРАНСГАЗ"	Y T C	"UKRTRANSGAZ" Public Joint-Stock Company
Філія "Управління магістральних		L'VIVTRANSGAZ
газопроводів ЛЬВІВТРАНСГАЗ БІБРСЬКЕ лінійне виробниче управління магістральних газопроводів		Main Pipeline Division BIBRKA Operating Pipeline Subdivision
Львівська обл. м.Бібрка, 81220 тел.: +38 (03263) 4-3015 e-mail: shvetc-oj@utg.ua	ISO 9001:2008 ISO 14001:2004 BS OHSAS 18001:2007	Bibrka, Lviv area, Ukraine, 81220 , tel.: +38 (03263) 4-3015 e-mail: shvetc-oj@utg.ua
8.12.2015p		

АКТ

на №

використання нових методів і апаратури діагностичних обстежень підземних трубопроводів

Цим підтверджуємо, що науковці Фізико-механічного інституту наук України Д. Т. Н. академії Національної ім. Г.В. Карпенка Р.М. Джала, к. т. н. Б.Я. Вербенець, М.І. Мельник дійсно проводили натурні випробування нової апаратури БВС-К для безконтактних вимірювань струмів підземних трубопроводів (ПТ) та ВПП-М для вимірювань постійних і змінних електричних напруг і поляризаційного потенціалу з метою вдосконалення методів діагностичних обстежень стану протикорозійного захисту ПТ. Названі прилади обладнані модулем визначення координат і часу (GPS) та електронною пам'яттю з інтерфейсом, що дає змогу передавати масиви даних вимірів у комп'ютер для їх опрацювання і документування.

Випробування апаратури БВС-К і ВПП-М проводили на трасах магістральних газопроводів «Івацевичі-Долина» II і III нитки, РГ «Липники-Персанківка», МГ «Івацевичі-Комарно», МГ «Угерсько-Львів» Бібрського ЛВУ МГ Філії УМГ «Львівтрансгаз» ПАТ «Укртрансгаз» Проводили експериментальні визначеннями розміщення ПТ, безконтактні міряння глибини залягання і струмів ПТ, вимірювання потенціалів, за якими можна контролювати електрохімічний захист від корозії і визначати параметри ізоляційних покривів на різних ділянках ПТ.

Спеціалісти Бібрського ЛВУ МГ вважають названі розробки ФМІ НАН України актуальними і практично важливими та зацікавлені у подальшій співпраці, придбанні і використанні нової апаратури для діагностичних обстежень ПТ.

PANEH Б. Й. Саловський Начальник Бібрського ПВУ МГ Б. В. Шуманський Начальник дільниці ПКЗ

ПУБЛІЧНЕ АКЦІЮНЕРЧЕ ТОВАРИСТВО МИСЛАЗВИ ДОБУБАННЯ-ФІЛІЯ ГАЗОПРОМИСНОСЕ УПРАВЛІННЯ "Л. С.ЭГАЗСИДОБУВАННЯ" КОМАРНІВСЬКИЙ ЦЕХ З ВИДОБУТКУ НАФТИ. ГАЗУ ТА ГАЗОВОГО КОНДЕНСАТУ вул. Геродсцька, 79, місте Комарно, Городоцький ряйен, Львівська область, 81562 .16 . 11 2015 D. No 557

AKT використання приладів для обстежень підземних трубопроводів

Комарнівський ЦВНГК Газопромислового управління "Львівгазвидобування" дійсно використовує створений у Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка Національної академії наук України портативний прилад типу ОРТ для визначення розміщення підземних комунікацій (технологічних трубопроводів УППГ, УКПГ та лінійної частини газопроводів). Працівники ФМІ надають допомогу консультаціями та профілактичним ремонтом приладу.

Фахівці Комарнівського ЦВНГК ознайомлені з новими розробками апаратури безконтактних вимірювань струмів БВС-К та вимірювача постійних і змінних електричних напруг і поляризаційного потенцалу ВПП-М, які обладнані модулем визначення координат і часу (GPS) та електронною пам'яттю з інтерфейсом, що дає змогу передавати виміри у комп'ютер для опрацювання і документування.

Вважаємо названі розробки ФМІ НАН України (д.т.н. Р.М. Джала, к.т.н. Б.Я. Вербенець, М.І. Мельник) актуальними і практично важливими для обстежень підземних трубопроводів і пов'язаних з ними металоконструкцій та зацікавлені у подальшій співпраці, придбанні і використанні нової апаратури на умовах договорів.

Начальник Комарнівського ЦВНГК ГПУ "Львівгазвидобування"



5. М. Іваницький

Молодовень І.З.



ЗАТВЕРДЖУЮ Головний иркенер Газопренислового управління «Двивгазвидобування» В. Є. Блізняков

А К Т використання приладів для обстежень підземних трубопроводів і металоконструкцій

Акт складений про те, що науковці Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України (ФМІ) дійсно співпрацюють з фахівцями Газопромислового управління «Львівгазвидобування» у галузі діагностичних обстежень і контролю протикорозійного захисту підземних трубопроводів і пов'язаних з ними металоконструкцій. Зокрема, у Комарнівському цеху конденсату і у Локачинському та газового видобутку нафти, газу нафтогазопромислі використовують створені у ФМІ вимірювачі потенціалу ВП-2 та портативні прилади типу ОРТ для визначення розміщення підземних консультаціями ΦΜί надають допомогу та комунікацій. Працівники профілактичним ремонтом приладів.

Фахівці ГПУ «Львівгазвидобування» ознайомлені з новими розробками приладу для вимірювань постійних і змінних електричних напруг з визначенням поляризаційного потенціалу (ВЕП) та апаратури безконтактних вимірювань струмів БВС, спорядженої засобом глобального позиціонування GPS і пам'яттю та інтерфейсом для передачі вимірів у комп'ютер, їх опрацювання і документування. Вважаємо названі розробки ФМІ НАН України (авторів д.т.н. Р. М. Джала, к.т.н. Б. Я. Вербенець, М. І. Мельник) актуальними і практично важливими для обстежень підземних трубопроводів і пов'язаних з ними металоконструкцій та зацікавлені у подальшій співпраці, придбанні і використанні нових приладів на умовах договорів.

Завідувач відділу електрофізичних методів неруйнівного контролю ФМІ НАН України

Alto-Р.М. Джала

11. 11. 2016 р.

Начальник виробничого відділу ГПУ «Львівгазвидобування»

Д. Потула <u>Д.</u> Р. Пітула



ЗАТВЕРДЖУЮ Соловний інженер, правління магістральних пазопроводав «ЛЬВІВТРАНСГАЗ» MATICTPA А.Б. Мицик TA30RPOBO **JIBBISTPAN**

АКТ використання методики і апаратури комплексних обстежень підземних трубопроводів

Акт складений про те, що методика комплексних діагностичних обстежень стану протикорозійного захисту підземних трубопроводів (ПТ) за безконтактними вимірами струму установки катодного захисту апаратурою БВС-К (з оцінками розподілу струму між гілками ПТ і з визначенням розподілу вздовж ПТ перехідного опору) та за контактними вимірами приладом ВПП-М постійних і змінних електричних напруг визначенням поляризаційного потенціалу «труба-земля» i «земля-земля» 3 використовувалась у 2015-2016 роках під час натурних експериментальних обстежень стану протикорозійного захисту (ПКЗ) ділянок магістральних газопроводів «Івацевичі-Долина» (II і III нитки, Ду 1220) і «Липники-Персенківка» (Ду 500 і Ду 700) Бібрського ЛВУМГ та «Опари-Угерсько» (Ду 1020) ВУ ПЗГ Опари УМГ «Львівтрансгаз» ДК «Укртрансгаз» НАК «Нафтогаз України».

Створені у Фізико-механічному інституті ім. Г. В. Карпенка НАН України прилади БВС-К та ВПП-М (виконавці: д. т. н. Р.М. Джала, к. т. н. Б.Я. Вербенець, М.І. Мельник) корисні для обстежень і контролю стану ПКЗ ПТ, дають змогу отримувати кількісні оцінки параметів ізоляції та ЕХЗ, виявляти місця корозії, підвищувати оперативність та інформативність діагностичних обстежень ПТ (особливо на важкодоступних ділянках та за несправності конрольно-вимірювальних пунктів). Застосовані в приладах система глобального позиціювання GPS і пам'ять суттєво полегшують опрацювання і документування результатів робіт на трасах трубопроводів.

Спеціалісти УМГ «Львівтрансгаз» зацікавлені у подальшій співпраці з науковцями ФМІ НАН України та у придбанні і використанні нової апаратури.

Р.М. Джала

Завідувач відділу електрофізичних методів неруйнівного контролю ФМІ НАН України

RADer 17.11.2016 p.

Начальник сектору ПКЗ УМГ «ЛЬВІВТРАНСГАЗ»

Р.С. Савула