

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Факультет автоматизації та енергетики

**Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного
менеджменту**

Мальцева Валерія Ростиславівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.2.08 : 620.197.5

(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

**Удосконалення системи дистанційного моніторингу електрохімічного
захисту підземних трубопроводів**

(назва роботи)

Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

(назва освітньої програми)

152 — «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»

(шифр і назва спеціальності)

**Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і
текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело:**

Здобувач освітнього ступеня В. Р. Мальцева
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник Барна О.Б., канд. техн.наук
(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

Допущено до захисту
Завідувач кафедри

В. С. Цих
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного менеджменту

Освітній рівень перший (бакалаврський) рівень вищої освіти

Спеціальність 152 — «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____

«____» _____ 2026 року

**З А В Д А Н Н Я
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Мальцева Валерія Ростиславівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи “Удосконалення системи дистанційного моніторингу електрохімічного захисту підземних трубопроводів”

керівник роботи Барна Ольга Борисівна, канд. техн.наук
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від “13” травня 2026 року № 215/7

2. Строк подання студентом роботи 12 червня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи: потенціал трубопроводу в межах від -0,85 В до -1,15 В;
діаметр трубопроводу $D=820$ мм; товщина стінки $\delta=9$ мм;
досліджувана ділянка довжиною $L=1000$ км; питомий електричний опір
грунту $\rho_{гр}=60$ Ом·м.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналіз процесів корозії та методи захисту трубопроводів

2. Розрахунок станцій катодного (електрохімічного) захисту нафтопроводів від корозії

3. Розробка та технічна реалізація системи дистанційного моніторингу ЕХЗ

4. Охорона праці

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

БР.МТ-30.00.001 Схематичне зображення видів електрохімічного захисту

БР.МТ-30.00.002 Схема катодного захисту

БР.МТ-30.00.003 Структурна схема станції катодного захисту

БР.МТ-30.00.004 Схема трирівневої системи дистанційного моніторингу електрохімзахисту підземних трубопроводів

БР.МТ-30.00.005 Моделювання розподілу захисного потенціалу із урахуванням взаємного впливу двох сусідніх СКЗ

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
4	Кривенко Г.М., доц. каф. ТЗБП		

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Вступ. Аналіз процесів корозії та методи захисту трубопроводів		
2.	Розрахунок станцій катодного (електрохімічного) захисту нафтопроводів від корозії		
3.	Розробка та технічна реалізація системи дистанційного моніторингу ЕХЗ		
4.	Охорона праці		
5.	Висновки. Оформлення роботи		

Студент _____
(підпис)

Мальцева В. Р.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Барна О. Б.
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Бакалаврська робота: 60 с., 6 рис., 3 табл., 21 джерело, 2 додатки, 5 аркушів креслень.

Мета дослідження — підвищення ефективності протикорозійного захисту підземних трубопроводів шляхом розробки та впровадження удосконаленої системи дистанційного моніторингу, яка забезпечує точне підтримання захисних потенціалів та оптимізацію енергоспоживання установок ЕХЗ.

Об'єкт дослідження — система електрохімічного захисту зовнішньої поверхні підземних нафтогазопроводів, що функціонує в умовах впливу агресивних середовищ та блукаючих струмів.

Предмет дослідження — параметри та методи дистанційного контролю роботи установок катодного, електродренажного та протекторного захисту, а також алгоритми передачі та обробки даних про корозійний стан об'єктів.

Обґрунтовано трирівневу архітектуру вимірювально-керуючого комплексу ЕХЗ. Розраховано оптимальний крок розташування СКЗ на основі експоненціального згасання потенціалу та взаємного впливу станцій, що дозволяє усунути зони корозійної небезпеки.

Проведено метрологічний розрахунок точності вимірювального тракту потенціалу «труба-земля» (сумарна зведена похибка склала 1,4%, що повністю задовольняє галузеві вимоги 2%-5%).

Розроблено алгоритм замкненого адаптивного керування захисним струмом, який дозволяє оптимізувати енергоспоживання системи.

Ключові слова: інформаційно-вимірювальна система, дистанційний моніторинг, станція катодного захисту, суперпозиція полів, коефіцієнт затухання, метрологічна похибка, моделювання.

ABSTRACT

Bachelor's thesis: 60 pages, 6 figures, 3 tables, 21 sources, 2 appendices, 5 sheets of drawings.

The aim of the study is to increase the efficiency of anti-corrosion protection of underground pipelines by developing and implementing an advanced remote monitoring system that ensures accurate maintenance of protective potentials and optimization of EChP (electrochemical protection) plants' energy consumption.

The object of the study is the electrochemical protection system of the external surface of underground oil and gas pipelines operating under the influence of aggressive media and stray currents.

The subject of the study is the parameters and methods of remote monitoring of cathodic, electrodrainage, and galvanic (sacrificial) protection plants' operation, as well as algorithms for transmission and processing of data on the corrosion state of objects.

The three-level architecture of the EChP measurement and control complex is substantiated. The optimal spacing of CPS (cathodic protection stations) is calculated based on exponential potential attenuation and the mutual influence of stations, which allows for eliminating corrosion hazard zones. A metrological calculation of the accuracy of the "pipe-to-ground" potential measuring tract was performed (the total reduced system error is 1.4%, which fully satisfies the industry requirements of 2%–5%). A closed-loop adaptive control algorithm for the protective current has been developed, allowing the optimization of system power consumption.

Keywords: information-measuring system, remote monitoring, cathodic protection station, field superposition, attenuation coefficient, metrological error, modeling.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АЦП — аналого-цифровий перетворювач.

ГТС — газотранспортна система.

ЕХЗ — електрохімічний захист (від корозії).

КВП — контрольно-вимірювальний пункт.

ЛЕП — лінія електропередачі.

МТ — магістральний трубопровід (нафтопровід / газопровід).

СКЗ (CPS) — станція катодного захисту.

DSP (ЦОС) — цифрова обробка сигналів (Digital Signal Processing).

LoRaWAN / LPWAN — енергоефективна бездротова мережа дальнього радіусу дії (Low-Power Wide-Area Network).

SCADA — диспетчерське управління та збір даних (Supervisory Control and Data Acquisition).

CPS (Cathodic Protection Station) — СКЗ (Станція катодного захисту)

RCMP (Remote Control and Measuring Point) — ДКВП (Дистанційний контрольно-вимірювальний пункт)

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ КОРОЗІЇ ТА МЕТОДИ ЗАХИСТУ	
ТРУБОПРОВОДІВ.....	11
1.1 Основні причини відмов на лінійній частині магістральних нафтогазопроводів.....	11
1.2 Аналіз механізмів корозійного руйнування об'єктів нафтогазового комплексу.....	14
1.3 Аналіз методів захисту підземних трубопроводів від зовнішньої корозії	18
1.3.1. Пасивний захист: захисні покриття.....	18
1.3.2. Активний захист: електрохімічний захист.....	20
1.3.3. Організаційно-технологічні заходи.....	23
Постановка задачі на бакалаврську роботу.....	24
2 РОЗРАХУНОК СТАНЦІЙ КАТОДНОГО (ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО)	
ЗАХИСТУ НАФТОПРОВОДІВ ВІД КОРОЗІЇ.....	25
2.1 Етапи та інструкції з проєктування ЕХЗ.....	25
2.2 Розрахунок станції катодного захисту.....	27
Висновки до розділу 2.....	34
3 РОЗРОБКА ТА ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ	
ДИСТАНЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ ЕХЗ.....	35
3.1. Розроблення схеми трирівневої архітектури системи моніторингу.....	35
3.2 Моделювання розподілу захисного потенціалу СКЗ та розрахунок їх взаємного розміщення.....	39
3.3. Оцінювання метрологічних характеристик системи моніторингу.....	44
Висновки до розділу 3.....	46
4 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	48
4.1 Охорона праці при роботі із розробленою системою.....	48

4.2 Забезпечення безпеки технологічних процесів, монтажу та експлуатації обладнання.....	49
4.3 Розрахунок захисного заземлення.....	51
4.4 Пожежна безпека та безпека в надзвичайних ситуаціях.....	53
ВИСНОВКИ.....	56
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	58

ВСТУП

Магістральні трубопроводи являють собою стратегічно важливі об'єкти національної інженерно-технічної інфраструктури, що забезпечують безперебійне, безпечне та суворо регульоване транспортування значних обсягів енергоносіїв — нафти, природного газу та нафтопродуктів — на великі відстані від місць видобутку до кінцевих споживачів [2]. В умовах сучасної глобалізації та зростаючої ролі енергетичної безпеки, динамічний розвиток промислового сектору економіки зумовлює постійне підвищення вимог до експлуатаційної надійності та довговічності таких систем.

Складність завдання полягає в тому, що значна частина діючого трубопровідного фонду України характеризується тривалим терміном експлуатації, що призводить до поступової деградації матеріалів та старіння ізоляційних покриттів. Аналіз аварійності на лінійній частині магістралей свідчить, що саме корозійні процеси, зокрема ґрунтова корозія та корозійне розтріскування під напругою (стрес-корозія), є домінуючим фактором виникнення відмов, на частку яких припадає понад 50% усіх інцидентів.

У зв'язку з цим, розробка та впровадження високоефективних систем антикорозійного захисту, що базуються на синергії якісної пасивної ізоляції та активного електрохімічного впливу, перетворюється з допоміжного заходу на пріоритетне технічне завдання. Тільки комплексний підхід, посилений засобами автоматизованого моніторингу, здатний забезпечити стабільність робочих параметрів системи та мінімізувати ризики екологічних катастроф і значних матеріальних втрат, спричинених розгерметизацією трубопроводів

Ефективність функціонування комплексного захисту визначається поєднанням характеристик ізоляційного покриття та стабільності роботи активних засобів електрохімічного захисту (ЕХЗ). В процесі експлуатації ізоляція піддається старінню та деструкції під впливом зовнішніх чинників, що спричиняє утворення дефектів і витік захисного струму [1, 4, 8, 9]. Як наслідок, відбувається падіння захисного потенціалу, що знижує загальний рівень

захищеності металу. Для запобігання корозійному руйнуванню необхідно здійснювати систематичний електрометричний моніторинг, спрямований на оперативну ідентифікацію пошкоджень покриття та оцінку працездатності систем ЕХЗ

Актуальність теми. Надійне функціонування нафтогазовидобувного комплексу безпосередньо залежить від стану розгалуженої мережі підземних трубопроводів та свердловинного обладнання. Корозія металевих комунікацій в умовах видобутку нафти і газу має складний характер, оскільки процеси руйнування протікають у гетерогенних системах незмішуваних середовищ: нафта-пластова вода або газовий конденсат-пластова вода. Велика металоємність систем збору, підготовки та транспортування продукції вимагає впровадження комплексного протикорозійного захисту, ключовим елементом якого є електрохімічний захист (ЕХЗ).

Досвід ВАТ «Укрнафта» демонструє, що використання засобів ЕХЗ спільно з інгібіторним захистом дозволяє кардинально знизити аварійність. Наприклад, у НГВУ «Охтирканафтогаз» кількість поривів скоротилася з 750 до 60–70 на рік. Проте на сьогодні впроваджено лише 317 установок катодного захисту на понад 3368 км трубопроводів, що часто є недостатнім для повного охоплення мережі. Основними проблемами залишаються незадовільний стан ізоляції, відсутність ізолюючих фланцевих з'єднань та нераціональне розташування станцій, через що захисний струм стікає в землю, не виконуючи свою функцію.

Удосконалення системи дистанційного моніторингу є критично важливим завданням, оскільки воно дозволяє перейти від періодичних обстежень до безперервного аналізу корозійного стану в режимі реального часу. Це дає змогу запобігати нераціональному використанню електроенергії та передчасному зносу анодних заземлювачів, що є актуальним економічним та технічним завданням для сучасної нафтогазової галузі.

Мета дослідження — підвищення ефективності протикорозійного захисту підземних трубопроводів шляхом розробки та впровадження

удосконаленої системи дистанційного моніторингу, яка забезпечує точне підтримання захисних потенціалів та оптимізацію енергоспоживання установок ЕХЗ.

Об'єкт дослідження — система електрохімічного захисту зовнішньої поверхні підземних нафтогазопроводів, що функціонує в умовах впливу агресивних середовищ та блукаючих струмів.

Предмет дослідження — параметри та методи дистанційного контролю роботи установок катодного, електродренажного та протекторного захисту, а також алгоритми передачі та обробки даних про корозійний стан об'єктів.

Методи дослідження.

У роботі використано методи теорії автоматичного керування, принципи суперпозиції та взаємного впливу електричних полів у неоднорідних середовищах, математичне моделювання процесів експоненціального затухання потенціалу в середовищі MATLAB, а також методи метрологічного аналізу для оцінювання похибок вимірювальних каналів.

1 АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ КОРОЗІЇ ТА МЕТОДИ ЗАХИСТУ ТРУБОПРОВОДІВ

1.1 Основні причини відмов на лінійній частині магістральних нафтогазопроводів

Нафтогазотранспортна інфраструктура України являє собою масштабний та багаторівневий енергетичний комплекс, який вирізняється високою потужністю, значною територіальною протяжністю та розгалуженою архітектурою об'єктів. Через те, що магістральні нафтогазопроводи мають різний експлуатаційний вік та неоднаковий технічний стан, процеси природного старіння металоконструкцій, а також висока інтенсивність аварійних випадків і пошкоджень на лінійній частині суттєво ускладнюють регламентне обслуговування системи та зумовлюють зростання фінансових витрат [1].

У сучасних умовах першочерговим завданням стає забезпечення стабільності та надійності роботи газових мереж, що необхідно для гарантування безперебійного постачання енергоносіїв, мінімізації технологічних втрат газу, запобігання техногенним аваріям та захисту навколишнього середовища від забруднення. Питання безпеки та екологічної стійкості магістрального транспортування потребують особливої уваги фахівців, зважаючи на ризики катастрофічних наслідків у разі виникнення масштабних інцидентів [1].

Аналітичне дослідження досвіду експлуатації магістральних трубопровідних систем дозволяє виокремити три найбільш критичні чинники їхнього руйнування: загальний корозійний знос, процеси втоми (малоциклове руйнування), а також стрес-корозію. Інші деструктивні явища відіграють менш значну роль, проте вони здатні виступати каталізаторами основних механізмів руйнування (зокрема, деградація структури металу, що проявляється у зниженні його пластичних властивостей, значно прискорює розвиток втомних тріщин). Найбільш небезпечним викликом для цілісності магістральних газопроводів на

сьогодні є прогресуюче явище стрес-корозії. Відповідно до статистичних даних, до 2000 року частка відмов, спричинених стрес-корозійними процесами, становила близько 30%, тоді як у теперішній час цей показник стрімко зріс і перевищує 50% від загальної кількості руйнувань [1].

Магістральні трубопроводи – це капітальні інженерно-технічні споруди, призначені для безперервного регульованого транспорту газу, нафти, нафтопродуктів та інших товарів на значні відстані [5].

Роль трубопровідного транспорту в економіці країни неухильно зростає. Ця обставина зумовлює вимогу надійності роботи трубопровідних систем. Слід зазначити, що проблема забезпечення працездатності і надійності магістральних трубопроводів багатопланова, проте одне з головних завдань – ефективний антикорозійний захист, оскільки основна причина виявлених відмов (аварій та інше) на лінійній частині магістральних трубопроводів – корозійне руйнування тіла труби (рис. 1.1) [4, 5, 13].

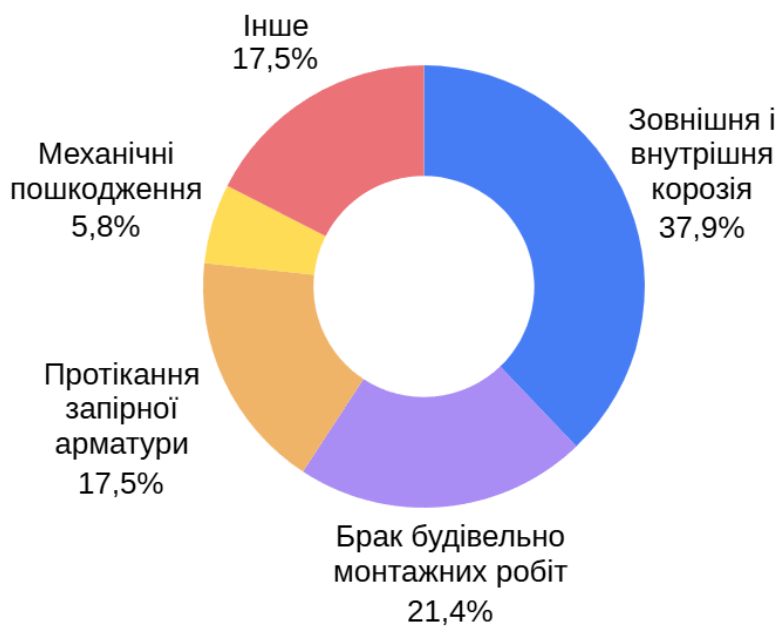


Рисунок 1.1 - Основні чинники, що призводять до відмов на лінійній частині магістральних трубопроводів

Згідно з даними галузевої статистики основними чинниками, що призводять до відмов на лінійній частині магістральних трубопроводів, є

поєднання природних агресивних факторів та технічних недоліків при будівництві та експлуатації.

Аналіз досвіду ВАТ «Укрнафта» та звіту (рис. 1.1) дозволяє виділити наступну структуру причин аварійності:

1. Корозійне руйнування (найвагоміша причина)

Корозія є безумовним «лідером» серед причин аварій, охоплюючи близько 40% усіх випадків на лінійній частині.

Зовнішня та внутрішня корозія. Цей показник є найвищим у структурі відмов. Внутрішня корозія обумовлена агресивністю середовищ (нафта-пластова вода, газовий конденсат), тоді як зовнішня — взаємодією металу з ґрунтовим електролітом.

Досвід вітчизняних підприємств показує критичну різницю в аварійності, зокрема, у підрозділах, де впроваджено комплексний (інгібіторний та електрохімічний) захист, кількість поривів скорочується в 10–12 разів (з 750 до 60–70 на рік). Відсутність такого захисту на інших ділянках призводить до стабільно високої кількості аварій (~700 на рік).

Ефективність захисту часто знижується через незадовільний стан ізоляції, відсутність ізолюючих фланців та нераціональне розташування катодних станцій, що призводить до витоку захисного струму в землю.

2. Дефекти будівництва та монтажу

На цей фактор припадає приблизно 22% аварій.

Це включає брак зварювальних робіт, порушення технології укладання труб у траншею та використання труб із заводськими дефектами.

До внутрішніх факторів руйнування також відносять напруження в металі та дефекти, що виникають саме під час зварювання.

3. Технічний стан запірної арматури та механічні пошкодження

Інші вагомі причини включають:

Протікання запірної арматури (~17%): Пов'язане зі зносом ущільнювачів та корозією елементів керування.

Механічні пошкодження (~6-7%): Виникають внаслідок несанкціонованих врізок, абразивного зносу частинками в потоці рідини або внаслідок проведення сторонніх земляних робіт.

4. Специфічні фактори впливу

Виділяються також додаткові умови, які прискорюють руйнування прямих ділянок:

Гетерогенність систем. Постійний контакт металу з водою, що відділяється від нафти чи конденсату.

Біокорозія. Життєдіяльність бактерій у ґрунті або всередині труби.

Блукаючі струми. Зовнішня електрична поляризація, яка вимагає використання електродренажного захисту.

Оскільки корозія становить майже половину всіх причин аварій, удосконалення дистанційного контролю дозволить виявляти «недозахищені» ділянки (де потенціал нижче норми) ще до того, як корозія призведе до наскрізного пошкодження, що фактично знизить головну причину відмов.

1.2 Аналіз механізмів корозійного руйнування об'єктів нафтогазового комплексу

Попередня підготовка нафти та газу до транспортування магістральними мережами включає технологічні операції з видалення агресивних домішок. Завдяки цьому частка пошкоджень, спричинених внутрішньою корозією, мінімізована і не перевищує 6% від загального обсягу корозійних руйнувань. Це обумовлює той факт, що основна небезпека для цілісності трубопроводів під час їх експлуатації зосереджена на зовнішній поверхні металу. Високий рівень корозійного навантаження пояснюється сукупністю факторів: значною протяжністю магістралей через різні гідрогеологічні зони, постійним контактом з ґрунтом, термічним впливом продукту на навколишнє середовище, а також перетином численних природних та штучних перешкод [1, 2, 5, 6].

Більшість конструкційних елементів трубопровідних систем виготовлені з вуглецевих та низьколегованих сталей. Через свою термодинамічну нестабільність такі сплави схильні до руйнування в більшості технологічних та природних середовищ (атмосфера, ґрунт, вода). При цьому на зовнішній поверхні об'єктів домінує саме електрохімічний механізм корозії, тоді як хімічна корозія зустрічається значно рідше [5, 6].

На рис. 1.2 наведено основні види деструктивних процесів, що відбуваються на стінках магістральних трубопроводів, внаслідок корозії [6].

Рисунок ілюструє комплексну картину пошкоджень, які класифікуються за місцем виникнення та механізмом руйнування.



Рисунок 1.2 - Основні пошкодження трубопроводу за місцем виникнення та механізмом руйнування

Внутрішні руйнування виникають внаслідок взаємодії металу з транспортувальним середовищем:

Пітингова (топіова) або рівномірна корозія проявляється у вигляді локальних заглиблень (виразок) або рівномірного зменшення товщини стінки труби по всій поверхні [6].

Корозія, спричинена потоком (ерозійна корозія) виникає в місцях інтенсивного руху рідини або газу, де механічний вплив потоку прискорює хімічне руйнування металу.

Процеси **зовнішньої корозії** (External corrosion) відбуваються на зовнішній поверхні труби під впливом навколишнього середовища (грунту, води або атмосфери):

Мікробіологічно обумовлена корозія (MIC): Руйнування, спричинене життєдіяльністю бактерій, що знаходяться у ґрунті або під шаром відкладень.

Окислення: Природний процес утворення оксидів металу при контакті з киснем.

Підшламова корозія (корозія під відкладеннями): Локальне руйнування під шаром продуктів корозії або накопиченого бруду, де створюються умови для інтенсивної концентрації агресивних агентів.

Процеси розтріскування (Cracking) - найбільш небезпечні дефекти, пов'язані з порушенням цілісності структури сталі:

Водневе розтріскування: Виникає через проникнення атомів водню в структуру металу, що робить його крихким.

Стрес-корозія (Корозійне розтріскування під напругою): Процес утворення тріщин внаслідок одночасної дії розтягувальних напружень (від тиску газу/нафти) та корозійного середовища. Саме цей фактор наразі спричиняє понад 50% аварій на газопроводах [6].

Збільшення крихкості - втрата металом пластичності, що робить його вразливим до різких ударів чи перепадів тиску.

Сульфідне корозійне розтріскування: Специфічний вид руйнування під впливом сірководню, що часто зустрічається при перекачуванні "кислих" сортів нафти та газу.

Електрохімічна корозія базується на законах електрохімічної кінетики. Процес полягає в окисленні металу в електропровідному середовищі, що супроводжується виникненням електричного струму. Характерною рисою є поділ поверхні на анодні та катодні ділянки. Продукти деструкції локалізуються переважно в анодних зонах, а загальна інтенсивність процесу визначається швидкістю взаємопов'язаних анодних і катодних реакцій [5].

Відповідно до умов експлуатації, електрохімічне руйнування сталевих споруд реалізується через такі форми:

- **атмосферна корозія** — під впливом вологого повітря або газів;
- **рідинна корозія** — при контакті з водним середовищем;
- **грунтова корозія** — внаслідок взаємодії з ґрунтовим електролітом та киснем;
- **електрокорозія** — під дією блукаючих струмів (від електрифікованого транспорту чи промислових заземлювачів);
- **контактна корозія** — виникає при електричному сполученні металів з різними потенціалами або структурно неоднорідних сплавів [5,6].

На відміну від електрохімічної, **хімічна корозія** протікає згідно із законами кінетики гетерогенних реакцій без утворення електричного струму. Продукти взаємодії формуються рівномірно на всій контактній поверхні. Такий механізм характерний для:

- **газової корозії** — високотемпературне окислення металу за відсутності вологи (наприклад, у вузлах газових турбін або котельних установках);
- **корозії в неелектролітах** — при транспортуванні агресивних рідких чи газоподібних середовищ з низькою електропровідністю (зокрема, високосірчистої нафти) [5].

Окрему увагу слід приділити **мікробіологічній корозії**, яка ініціюється або прискорюється життєдіяльністю мікроорганізмів. Найбільш небезпечними є сульфатвідновлювальні бактерії, продуктом метаболізму яких є сірководень. Ця

сполука виступає потужним стимулятором корозії, що призводить до значних втрат металу в забруднених водах та ґрунтах [5, 6].

Оскільки ґрунтова корозія та електрокорозія (блукаючі струми) є основними загрозами, система дистанційного моніторингу має бути сфокусована саме на точному вимірюванні різниці потенціалів у цих специфічних умовах.

1.3 Аналіз методів захисту підземних трубопроводів від зовнішньої корозії

Захист підземних трубопроводів від зовнішньої корозії — це комплексний процес, який базується на поєднанні пасивних (ізоляційні покриття) та активних (електрохімічний захист) методів. Такий підхід дозволяє нівелювати вплив ґрунтового електроліту, вологи та блукаючих струмів. Розглянемо 3 методи захисту підземних трубопроводів.

1.3.1. Пасивний захист: захисні покриття

Це перший бар'єр, який фізично ізолює метал труби від контакту з корозійним середовищем (ґрунтом та водою).

Типи покриттів. Використовуються ізоляційні покриття «дуже посиленого типу», які наносяться переважно в заводських умовах для забезпечення максимальної адгезії та суцільності.

Підготовка поверхні. Перед нанесенням ізоляції метал очищують від іржі, бруду та жиру до ступеня Sa 2½, що забезпечує надійне зчеплення матеріалу з поверхнею [4].

Матеріали. Найпоширенішими є полімерні стрічки, епоксидні покриття або лакофарбові матеріали (ЛФП). ЛФП створюють суцільну плівку, яка перешкоджає дифузії агресивних агентів до металу.

Контроль якості. Після нанесення обов'язково перевіряється товщина покриття (товщиноміром), його адгезія до сталі та суцільність за допомогою дефектоскопа (пошук мікротріщин електричною іскрою) [4].

Нижче наведено основні вимоги до захисних покриттів підземних сталевих газопроводів [10].

Загальні положення та нормативна база. Протикорозійний захист підземних сталевих газопроводів здійснюється шляхом нанесення спеціальних покриттів, параметри яких регламентуються проектною документацією та вимогами чинних стандартів, зокрема ДСТУ Б В.2.5-29 [10].

Підготовка поверхні. Ефективність адгезії покриття безпосередньо залежить від якості підготовки металу. Перед ізоляційними роботами поверхня труб та зварних з'єднань має бути повністю очищена від забруднень (бруду, продуктів корозії, жирових плям, льоду) та, за потреби, осушена. Ступінь очищення повинен відповідати нормам ДСТУ ISO 12944-4 (рівні 1–4 залежно від специфікації покриття) [10].

Вимоги до нанесення ізоляції. Для магістральних ділянок передбачено використання ізоляції дуже посиленого типу, яка наноситься механізованим способом у заводських або базових умовах. Усі витратні матеріали повинні мати сертифікати якості та бути промислового виробництва [4, 10].

Ізоляція стиків та фасонних елементів. Роботи з ізолювання зварних стиків, фасонних частин (конденсатозбірників, колін тощо) та ремонт пошкоджених ділянок виконуються безпосередньо на трасі. При цьому мають використовуватися ізоляційні матеріали, ідентичні за властивостями основному покриттю трубопроводу [4, 10].

Багаторівневий контроль якості. Оцінка стану захисного покриття здійснюється поетапно за допомогою візуального огляду та інструментальних вимірювань [4]:

До укладання в траншею: проводиться дефектоскопія всієї поверхні на суцільність, а також вибірковий контроль товщини (товщиноміром) та адгезії (адгезіметром) кожної десятої труби.

Для трасових з'єднань: перевіряється суцільність усіх ізольованих стиків, а показники адгезії та товщини контролюються на 10% одиниць.

Після засипання трубопроводу: виконується фінальна інструментальна перевірка на відсутність електричного контакту між металом труби та ґрунтом. Результати випробувань фіксуються у будівельно-технічному паспорті [4].

Специфікація для лакофарбових покриттів. Підготовка сталі під фарбування повинна відповідати ступеню РЗ, а очищення поверхні — рівню Sa 2 ½ за ДСТУ ISO 8501.

Технологія фарбування. Нанесення антикорозійних лакофарбових матеріалів проводиться згідно з ДСТУ ISO 12944 та іншими профільними стандартами. Покриття накладається рівномірними шарами з обов'язковим інструментальним контролем товщини кожного шару та візуальною перевіркою цілісності.

Параметри товщини. Сумарна товщина захисного лакофарбового шару має становити не менше 280 мкм, що відповідає стандартам довговічності для агресивних середовищ.

Стійкість до зовнішніх факторів. Фінішне покриття повинно мати високу стійкість до ультрафіолетового випромінювання, зберігаючи стабільність кольору та захисні властивості протягом тривалого періоду експлуатації.

Таким чином система дистанційного моніторингу може бути ідеальним інструментом для автоматизації цього контролю протягом усього терміну експлуатації, а не лише під час будівництва.

1.3.2. Активний захист: електрохімічний захист

Оскільки жодне покриття не є ідеальним (можуть бути мікротріщини або пошкодження при монтажі), застосовують електрохімічний захист (ЕХЗ). Його суть полягає у зміні електричного потенціалу труби таким чином, щоб процес руйнування став енергетично неможливим.

Електрохімічний захист є фундаментальним методом протидії корозії, принцип дії якого базується на зміщенні електродного потенціалу металу в область значень, де швидкість його іонізації стає мінімальною. Згідно з

класифікацією засобів ЕХЗ підземних металевих споруд, виділяють три основні типи систем (рис. 1.3) [11]:

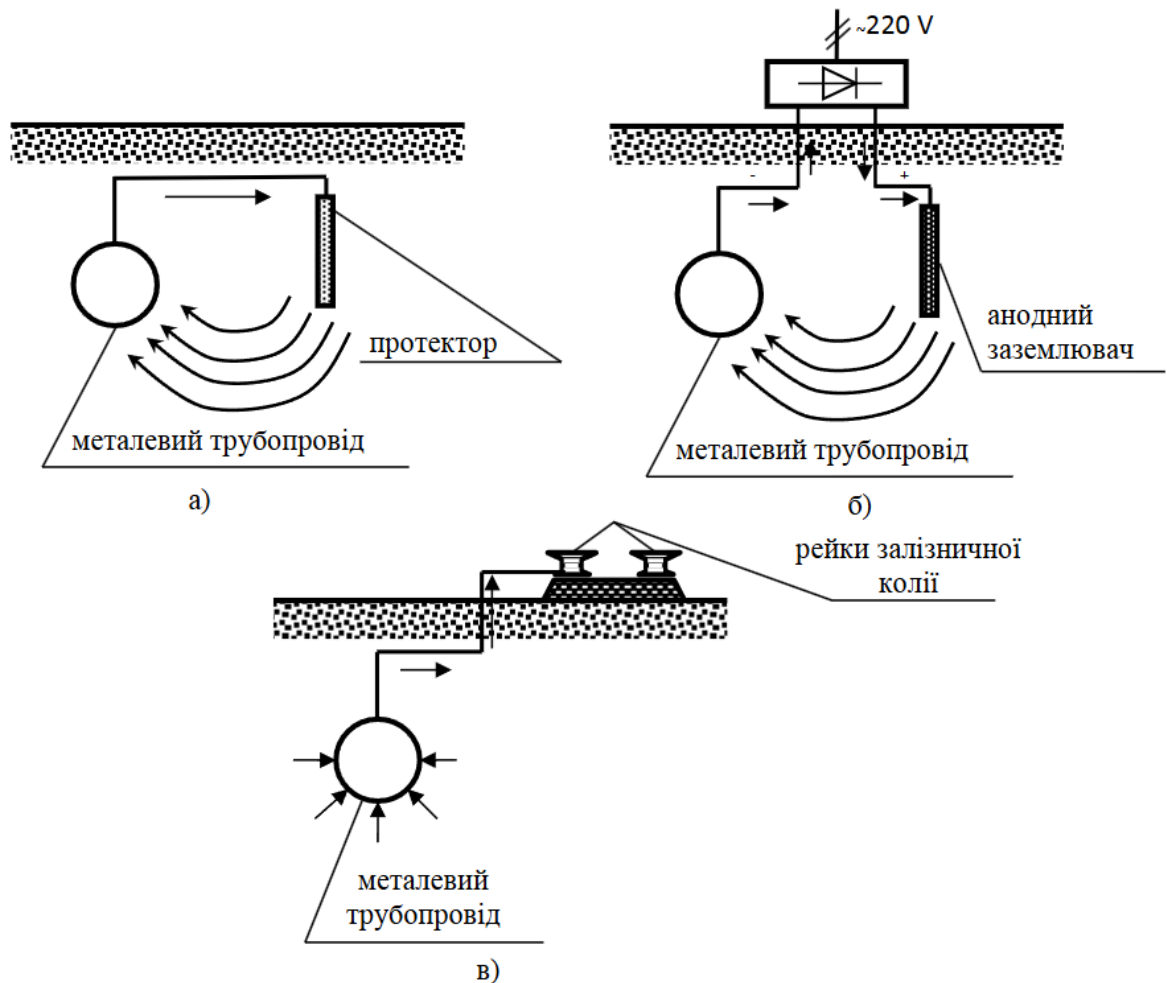


Рисунок 1.3 - Схематичне зображення видів електрохімічного захисту [11]:

а) - протекторний захист; б) - катодний захист; в) - електродренажний захист

1. Протекторний захист (Гальванічний)

Механізм дії протекторного захисту ґрунтується на використанні енергії гальванічної пари, що утворюється між трубопроводом та спеціальним електродом — протектором. Як матеріал для протектора застосовують метали з більш від'ємним електрохімічним потенціалом, ніж у сталі (магній, алюміній, цинк).

При замиканні електричного кола протектор стає анодом і руйнується, віддаючи електрони трубопроводу, який набуває властивостей катода.

Особливості: Цей метод є автономним, проте його радіус дії обмежений, що робить його ефективним для об'єктів з якісною ізоляцією або локальних ділянок мережі [11].

2. Катодний захист від зовнішнього джерела

На відміну від гальванічного способу, катодний захист використовує зовнішню енергію. Система складається зі станції катодного захисту (СКЗ), анодного заземлення та з'єднувальних кабелів.

Від'ємний полюс джерела постійного струму під'єднують до трубопроводу, а додатний — до анодного заземлювача. Це створює примусове натікання захисного струму з ґрунту на метал труби.

Основною перевагою є можливість регулювання захисного струму в широкому діапазоні, що дозволяє захищати протяжні ділянки магістральних газопроводів навіть за значної деградації ізоляційного покриття [11].

3. Електродренажний захист

Цей вид захисту розроблений спеціально для нейтралізації негативного впливу блукаючих струмів, джерелом яких найчастіше є електрифікований рейковий транспорт.

У місцях, де блукаючі струми мають стікати з труби в землю (що викликає інтенсивну електрокорозію), встановлюється дренажний зв'язок. Струм «відводиться» (дренується) металевим провідником безпосередньо назад до рейок або відсмоктувального пункту тягової підстанції.

Особливості: Електродренаж перетворює неконтрольований шкідливий процес на кероване натікання захисного струму, забезпечуючи стабільну поляризацію металу [11].

В умовах активного техногенного впливу найбільш ефективною є **катодна поляризація**. Це процес, під час якого металевий об'єкт під дією зовнішнього струму набуває катодного зміщення потенціалу. В результаті потенціал стає більш від'ємним порівняно зі стаціонарним (природним) потенціалом корозії. Це пригнічує анодні реакції розчинення заліза,

забезпечуючи формування надійної електрохімічної системи захисту підземного металофонду.

Варто зазначити, що дистанційний контроль є найбільш затребуваним саме для катодного захисту, оскільки станції катодного захисту потребують постійного моніторингу вихідних параметрів (струму та напруги) для забезпечення оптимального захисного потенціалу «труба-земля».

1.3.3. Організаційно-технологічні заходи

Крім прямих методів захисту, важливу роль відіграє правильна експлуатація:

Моніторинг: Постійний контроль за швидкістю корозії та станом засобів ЕХЗ за допомогою дистанційних систем моніторингу.

Ізолювальні з'єднання: Використання ізолювальних фланців для розчленування трубопроводу на окремі електричні секції, що підвищує ефективність роботи катодних станцій.

Бактерицидний захист: Застосування спеціальних реагентів для пригнічення життєдіяльності сульфатвідновлювальних бактерій, які спричиняють мікробіологічну корозію.

Таким чином, найнадійнішим методом захисту підземних магістралей є комплексний захист, коли якісне ізоляційне покриття доповнюється стабільною роботою установок катодного захисту під постійним інструментальним наглядом.

Постановка задачі на бакалаврську роботу

Проаналізувавши основні причини відмов на лінійній частині магістральних нафтогазопроводів, механізми корозійного руйнування об'єктів нафтогазового комплексу, а також методи захисту підземних трубопроводів від зовнішньої корозії було обрано як об'єкт дослідження катодний захист зовнішньої поверхні підземних нафтогазопроводів. Таким чином метою роботи є підвищення ефективності протикорозійного захисту підземних трубопроводів шляхом розробки та впровадження удосконаленої системи дистанційного моніторингу, яка забезпечує точне підтримання захисних потенціалів та оптимізацію енергоспоживання установок ЕХЗ.

Відповідно до поставленої мети необхідно виконати наступні задачі:

- ознайомитися із основними етапами проєктування ЕХЗ;
- здійснити розрахунок станції катодного захисту для конкретного об'єкта підземного нафтогазопроводу;
- розробити схему трирівневої архітектури системи дистанційного моніторингу стану катодного захисту;
- здійснити моделювання розподілу захисного потенціалу СКЗ та розрахувати їх взаємне розміщення;
- оцінити метрологічні характеристики системи моніторингу;
- ознайомитися з питаннями охорони праці при роботі із розробленою системою та забезпеченням безпеки технологічних процесів, монтажу та експлуатації обладнання;
- розрахувати захисне заземлення.

2 РОЗРАХУНОК СТАНЦІЙ КАТОДНОГО (ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО) ЗАХИСТУ НАФТОПРОВОДІВ ВІД КОРОЗІЇ

Проектування електрохімічного захисту (ЕХЗ) магістральних трубопроводів регламентується державними будівельними нормами ДБН В.2.5-20:2018 «Газопостачання» та стандартами ДСТУ 4219-2003 «Трубопроводи сталеві магістральні. Загальні вимоги до захисту від корозії» [2-4, 10]. Метою є підтримання поляризаційного потенціалу трубопроводу в межах від $-0,85$ В до $-1,15$ В (відносно мідно-сульфатного електроду порівняння) для запобігання підземній та ґрунтовій корозії.

2.1 Етапи та інструкції з проектування ЕХЗ

Для проектування ЕХЗ здійснюють такі кроки [4]:

1. Збір вихідних даних

Проектні роботи починаються з аналізу умов навколишнього середовища та параметрів самої споруди.

Характеристики ґрунту: питомий електричний опір ρ (Ом·м), кислотність (рН), наявність блукаючих струмів від електротранспорту чи промислових підприємств.

Параметри трубопроводу: діаметр, товщина стінки, протяжність ділянки Розрахунок параметрів катодного захисту.

Ізоляційне покриття: тип захисного покриття (екструдований поліетилен, бітум тощо) та його перехідний опір.

2. Вибір типу електрохімічного захисту

Катодний захист: використовується для магістральних трубопроводів і промислових об'єктів. Захисний струм подається від зовнішнього джерела постійного струму через анодне заземлення Електрохімічний захист газопроводу та трубопроводу.

Протекторний захист: застосовується у зонах з високим питомим опором ґрунту, за відсутності джерел живлення або на локальних ділянках (переходи

через дороги). Захист забезпечується за рахунок металів з більш від'ємним потенціалом (магнієві, цинкові протектори).

Дренажний захист: застосовується на ділянках впливу блукаючих струмів (наприклад, поблизу залізниць), для відведення струму з труби назад у рейку чи джерело.

3. Основні розрахунки, що включають:

- розрахунок загальної площі захисту;
- визначення захисного струму;
- розрахунок анодного заземлення: визначається кількість, тип (наприклад, феросилідові або графітові електроди) та глибина залягання анодів для забезпечення мінімального перехідного опору розтіканню струму.

4. Засоби контролю та безпеки

У проєкті обов'язково передбачаються контрольно-вимірювальні пункти (КВП), які встановлюються на трасі для вимірювання захисних потенціалів та перевірки цілісності ізоляції без розкриття ґрунту [4].

Передбачаються заходи електрохімічного захисту на промислових об'єктах: ізолюючі вставки для запобігання витоку захисного струму на комунікації станцій чи житлових масивів ДСТУ 4612:2006 Магістральні трубопроводи. Захист [3, 4].

Для захисту самих станцій катодного захисту від перенапруг передбачаються обмежувачі імпульсних перенапруг.

Регулювання системи ЕХЗ на новозбудованому об'єкті дозволяється виконувати не раніше ніж через 6 місяців після засипки траншеї, щоб стабілізувався ґрунт згідно Правил технічної експлуатації магістральних газопроводів.

Магістральні нафтопроводи є важливою частиною енергетичної інфраструктури України. У даному розрахунку розглядалися ділянки магістрального нафтопроводу, що проходить є частиною нафтопроводу “Дружба”, діаметром 820 мм, товщиною стінки 9 мм і загальною довжиною близько 1000 км. Головна мета дослідження — визначення оптимальних

розрахункових параметрів станцій катодного (електрохімічного) захисту для забезпечення довгострокової надійності трубопроводу.

2.2 Розрахунок станції катодного захисту

Вибір типу станції катодного захисту газопроводу здійснено для об'єкта контролю з такими вихідними даними:

- діаметр трубопроводу $D=820$ мм;
- товщина стінки $\delta=9$ мм;
- досліджувана ділянка довжиною $L=1000$ км;
- питомий електричний опір ґрунту $\rho_{\text{гр}}=60$ Ом·м.

Поздовжній опір одиниці довжини трубопроводу розраховується так:

$$R_T = \frac{\rho_T}{\pi(D-\delta)\delta}, \quad (2.1)$$

де ρ_T - питомий електричний опір металу, $\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$;

D - діаметр трубопроводу, мм;

δ - товщина стінки трубопроводу, мм.

$$R_T = \frac{0,245 \cdot 10^{-6}}{3,14 \cdot 0,009 \cdot (0,82 - 0,009)} = 10,67 \cdot 10^{-6} \text{ Ом/м.}$$

Опір одиниці довжини ізоляції наприкінці нормативного терміну служби станції катодного захисту (СКЗ):

$$R_{\text{із,т}} = \frac{R_{\text{із,поч}}}{\pi D} e^{-k\tau}, \quad (2.2)$$

де $R_{\text{із,т}}$ - середній опір ізоляції на одиницю довжини трубопроводу за нормативний термін служби, Ом·м;

$R_{\text{із,поч}}$ - початковий перехідний опір ізоляції, Ом·м²;

D - зовнішній діаметр трубопроводу, м;

k - коефіцієнт старіння (зносу) ізоляційного покриття, рік⁻¹;

τ - нормативний термін служби станції катодного захисту, років.

$$R_{\text{із,т}} = \frac{9000}{3,14 \cdot 0,82} \cdot e^{-0,125 \cdot 9,5} = 10660 \text{ Ом/м.}$$

$$R_{\text{із,сеп}} = \frac{R_{\text{із,поч}}}{\pi D k \tau} e^{(1-k\tau)}, \quad (2.3)$$

$$R_{\text{із,сеп}} = \frac{9000}{3,14 \cdot 0,82 \cdot 0,125 \cdot 9,5} e^{(1-0,125 \cdot 9,5)} = 2045,8 \text{ Ом/м.}$$

Ця формула враховує поступове погіршення захисних властивостей ізоляційного покриття протягом усього терміну експлуатації катодної станції. Вона є середнім значенням між початковим станом покриття та його станом наприкінці нормативного строку служби.

Для розрахунку вхідного опору трубопроводу використовується формула:

$$Z = \frac{1}{2} \sqrt{R_T \cdot R_{\text{із}}} \quad (2.4)$$

де Z — вхідний опір трубопроводу, Ом;

R_T — поздовжній опір трубопроводу, Ом/м;

$R_{\text{із}}$ — опір ізоляції одиниці довжини трубопроводу, Ом/м.

Для середнього значення опору трубопроводу за нормативний термін експлуатації катодних установок:

$$Z_{\text{сеп}} = \frac{1}{2} \sqrt{R_T \cdot R_{\text{із,сеп}}}. \quad (2.5)$$

$$Z_{\text{сеп}} = 0,5 \sqrt{10,67 \cdot 10^{-6} \cdot 2045,8} = 73,9 \cdot 10^{-3} \text{ Ом.}$$

Коефіцієнт затухання струмів і потенціалів вздовж трубопроводу наприкінці нормативного терміну експлуатації катодних установок є сталим і становить

$$\alpha = \sqrt{\frac{R_T}{R_{\text{із,т}}}}; \quad (2.6)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{10,67 \cdot 10^{-6}}{1066}} = 10^{-4} \frac{1}{\text{м}}.$$

Встановлюємо відстань винесення анодного заземлення від трубопроводу $y=350$ м, тоді параметр Θ рівний:

$$\Theta = \frac{\rho_{\text{гр}}}{2\pi Z y}, \quad (2.7)$$

де $\rho_{\text{гр}}$ - питомий електричний опір ґрунту, Ом·м;

Z_{τ} - вхідний опір трубопроводу наприкінці нормативного терміну експлуатації, Ом;

y - відстань між трубопроводом та анодним заземленням, м.

$$\Theta = \frac{60}{2 \cdot 3,14 \cdot 53,9 \cdot 10^{-3} \cdot 350} = 0,512.$$

Коефіцієнт взаємного впливу СКЗ:

$$K_{\Pi} = \frac{1}{1 + \sqrt{1 - \left(\frac{\Delta U}{\Delta U_3}\right)^2} \cdot (1 + \Theta)}, \quad (2.8)$$

де ΔU - мінімальний захисний потенціал, В;

ΔU_3 - потенціал на виході зони захисту, В;

Θ - параметр взаємного впливу.

$$K_{\Pi} = \frac{1}{1 + \sqrt{1 - \left(\frac{0,3}{0,55}\right)^2} \cdot (1 + 0,512)} = 0,57.$$

Довжина зони захисту одного трубопроводу СКЗ наприкінці нормативного терміну експлуатації

$$l_{\text{СКЗ}} = \frac{2}{\alpha} \ln \left[\frac{\Delta U_3}{K_{\Pi} \cdot \Delta U \cdot (1 + \Theta)} \right]. \quad (2.9)$$

$$l_{\text{СКЗ}} = \frac{2}{10^{-4}} \ln \left[\frac{0,55}{0,57 \cdot 0,3 \cdot (1 + 0,512)} \right] = 13255 \text{ м}$$

Середнє значення струму навантаження СКЗ :

$$I_{\text{н}} = \frac{\Delta U_3}{Z_{\text{сер}} [1 + 2 \cdot \exp(\alpha \cdot l_{\text{СКЗ}}) \cdot K_{\Pi} \cdot \Theta]}, \quad (2.10)$$

$$I_{\text{н}} = \frac{0,55}{73,9 \cdot 10^{-3} [1 + 2 \cdot \exp(10^{-4} \cdot 13255) \cdot 0,512]} = 3,8 \text{ А}$$

Глибина закладення центральної частини електродів анодного заземлення становить $h = 2,2$ м, а відстань між ними - 7 м. Опір розтікання першого вертикального електрода становить:

$$R_{1e} = \frac{\rho}{2\pi l} \left[\ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4h+l}{4h-l} \right], \quad (2.11)$$

$$R_{1e} = 0,16 \frac{60}{1,4} \left[\ln \frac{2,8}{0,03} + \frac{1}{2} \ln \frac{4 \cdot 2,2 + 1,4}{4 \cdot 2,2 - 1,4} \right] = 32,2 \text{ Ом.}$$

Коефіцієнти A_i та B_i є табличними безрозмірними параметрами, що враховують взаємний електричний вплив сусідніх електродів анодного заземлення під час розтікання струму в ґрунті. Їх значення залежать від геометричних розмірів електродів, відстані між ними та глибини встановлення і використовуються при визначенні опору розтікання групового анодного заземлення [11].

A_i характеризує відносну відстань між електродами:

$$A_i = \frac{l}{ia}, \quad (2.12)$$

де l - довжина електрода;

a - крок (відстань між сусідніми електродами);

i - номер сусіднього електрода.

B_i характеризує вплив глибини залягання електрода:

$$B_i = \frac{2h}{ia}, \quad (2.13)$$

де h - глибина центра електрода.

Ці коефіцієнти входять до логарифмічних доданків формул розрахунку опору розтікання центрального та крайнього електродів групового анодного заземлення. Їхні розраховані значення подані у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 Розраховані значення параметрів А та В

Коефіцієнт\номер електрода	1	2	3	4
А	0,61	0,31	0,21	0,16
В	0,01	0,06	0,033	0,025

Опір розтікання для n електродів визначається за формулою:

$$R_{ie} = R_{1e} \left[1 + \frac{\rho}{2\pi l} \sum_{i=1}^{n-1} \ln \left(\frac{A_i + B_i + \sqrt{1 + (A_i + B_i)^2}}{A_i - B_i + \sqrt{1 + (A_i - B_i)^2}} \right) \right]. \quad (2.14)$$

Розраховані значення опорів для центрального ($i=2$) та крайнього ($i=4$) електродів групового анодного заземлення рівні відповідно:

$$R_{\text{ц}}=36 \text{ Ом},$$

$$R_{\text{к}}=34,9 \text{ Ом}.$$

Коефіцієнт екранування враховує взаємний вплив електродів у груповому анодному заземленні:

$$\eta_e = \frac{2R_{1e}}{R_{\text{ц}}+R_{\text{к}}}; \eta_e = \frac{2 \cdot 32,2}{36+34,9} = 0,91. \quad (2.15)$$

Оптимальна кількість електродів анодного заземлення:

де:

$$n_{\text{опт}} = 4,13 \sqrt{\frac{IR_{1e}g}{\rho_{\text{гр}} k_1 k_2 \eta_e (\varphi_a + \varphi_k)}}, \quad (2.16)$$

I - струм катодної станції, А;

g - допустима густина струму для матеріалу анода, А/м²;

k_1, k_2 - коефіцієнти використання анода;

η_e коефіцієнт екранування;

φ_a - анодний потенціал;

φ_k - катодний потенціал.

Розраховане значення $n_{\text{опт}} = 5,16 \approx 5$, тобто прийнята та розрахована кількість електродів збігаються (округляємо до 5).

Опір анодного заземлення розраховують таким чином:

$$R_a = \frac{R_{1e}}{n_{\text{опт}} \eta_e}; \quad (2.17)$$

$$R_a = \frac{32,2}{5 \cdot 0,91} = 7,08 \text{ Ом}.$$

Формула для визначення економічно доцільного перерізу дренажного проводу має вигляд:

$$S_{\text{пр}} = 2,95 I_{\text{др}} \sqrt{\frac{\rho_{\text{пр}} T}{\Delta U \cdot k (\varphi_a + \varphi_k)}}, \quad (2.18)$$

де $I_{\text{др}}$ - середній струм навантаження станції катодного захисту, А;

$\rho_{\text{пр}}$ - питомий електричний опір матеріалу проводу, Ом·мм²/м;

T - нормативний термін служби дренажного проводу (роки);

ΔU - допустиме падіння напруги в дренажному колі, В;

k - коефіцієнт використання проводу;

ϕ_a - анодна поляризація, В;

ϕ_k - катодна поляризація, В.

Розраховане значення оптимального перерізу дренажного провідника:

$$S_{\text{пр}} = 2,95 \cdot 3,8 \sqrt{\frac{0,029 \cdot 0,02}{0,01 - 0,7(0,15 + 0,148)}} = 5,91 \text{ мм}^2.$$

Після розрахунку зазвичай приймають найближчий стандартний переріз проводу, тобто 6 мм². Це забезпечує необхідну провідність і механічну міцність дренажного кола.

Визначаємо опір дренажної лінії:

$$R_{\text{пр}} = \rho_{\text{пр}} \frac{L_{\text{пр}}}{S_{\text{пр}}}, \quad (2.19)$$

де $\rho_{\text{пр}}$ - питомий електричний опір матеріалу проводу, Ом·мм²/м;

$L_{\text{пр}}$ - довжина дренажної лінії, м;

$S_{\text{пр}}$ - площа поперечного перерізу проводу, мм².

$$R_{\text{пр}} = 0,029 \frac{350}{9,6} = 1,05 \text{ Ом}.$$

Визначаємо середнє значення напруги на вихідних контактах СКЗ:

$$\Delta E_{\text{ср}} = (\Delta U_z - \Delta U_{\text{мін}}) + I_{\text{др}} (R_{\text{пр}} + R_a), \quad (2.20)$$

де $\Delta E_{\text{ср}}$ - середня вихідна напруга станції катодного захисту, В;

ΔU_z - захисна різниця потенціалів на трубопроводі, В;

$\Delta U_{\text{мін}}$ - мінімальна захисна різниця потенціалів, В;

$I_{\text{др}}$ - струм навантаження СКЗ, А;

$R_{\text{пр}}$ - опір дренажної лінії, Ом;

R_a - опір анодного заземлення, Ом.

$$\Delta E_{\text{ср}} = (0,55 - 0,3) + 3,8 (1,06 + 7,08) = 31,2 \text{ В}$$

Середня споживана потужність СКЗ:

$$P_{\text{СКЗ}} = I_{\text{др}} \Delta E_{\text{ср}}, \quad (2.21)$$

$$P_{\text{СКЗ}} = 3,8 \cdot 31,2 = 118,5 \text{ Вт.}$$

На основі отриманих значень обирається стандартна типова комплектна катодна станція. Найбільш підходящою є СКЗ-500 (потужність 0,5 кВт, напруга 10–50 В, струм 10 А).

Визначаємо кількість СКЗ, що необхідна для захисту всього трубопроводу (довжиною 1000 км):

$$N_{\text{СКЗ}} = \frac{L_{\text{тр}}}{l_{\text{СКЗ}}}, \quad N_{\text{СКЗ}} = \frac{1000 \cdot 10^3}{13255} \approx 75 \text{ одиниць} \quad (2.22)$$

Термін служби анодного заземлення, встановленого в ґрунт:

$$\tau_a = \frac{m \eta_e n}{I_{\text{др}} g} \quad (2.23)$$

де τ_a - термін служби анодного заземлення, років;

m - маса одного анодного електрода, кг;

η_e - коефіцієнт екранування електродів;

n - кількість електродів;

$I_{\text{др}}$ - струм навантаження СКЗ, А;

g - питомі втрати анодного матеріалу, кг/(А·рік).

$$\tau_a = \frac{10 \cdot 0,91 \cdot 5}{3,80 \cdot 0,2} = 59,9 \text{ років}$$

Оскільки термін служби системи анодного заземлення перевищує 10 років, катодний захист трубопроводу буде забезпечуватися стабільно. Якби ця умова не виконувалася, виникла б потреба у збільшенні кількості анодних заземлювачів.

Висновки до розділу 2

В результаті проведених розрахунків :

- обрано станцію катодного захисту відповідно до розрахункових параметрів - СКЗ-500 (потужність 0,5 кВт, напруга 10–50 В, струм 10 А);
- необхідна кількість СКЗ для ефективного захисту всього нафтопроводу склала 75 одиниць.

Об'єкти нафтогазовидобутку через корозійні процеси належать до категорії підвищеної небезпеки. Фізико-хімічні властивості пластової продукції (нафта, газ, супутня вода) безпосередньо впливають на їхню корозійну активність, де особливу роль відіграють склад і властивості води. Агресивність свердловинної продукції залежить від багатьох внутрішніх та зовнішніх факторів: умов формування нафти, газу та води в родовищі, методів розробки та експлуатації, а також технологій видобутку, підготовки та транспортування.

Нафтопромислове обладнання - це комплекс агрегатів та систем, які забезпечують безперервну роботу нафтогазової галузі. Воно включає обладнання для буріння, освоєння та ремонту ущільнень, а також засоби збору, підготовки, зберігання та транспортування сировини. За впливом корозійних факторів його можна розділити на групи: бурове обладнання, системи підтримання пластового тиску, системи збору та транспортування, обладнання для підготовки та резервуари для зберігання. Наявність води в робочому середовищі на пізніх стадіях розробки родовищ значно інтенсифікує процеси корозійного руйнування, знижуючи надійність всього комплексу.

3 РОЗРОБКА ТА ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ДИСТАНЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ ЕХЗ

3.1. Розроблення схеми трирівневої архітектури системи моніторингу

Зазвичай в автоматизованих системах ЕХЗ дистанційним моніторингом охоплені лише СКЗ. Пропонується автоматизована система ЕХЗ із використанням технологій дистанційної передачі даних, яка також охоплює і контрольно-вимірювальні пункти. Це дає змогу контролювати захисний потенціал шляхом дистанційного моніторингу КВП усередині трубопроводу між сусідніми СКЗ, а також у всіх корозійно-небезпечних зонах, де також встановлені контрольно-вимірювальні пункти. Це забезпечує більш повну картину захищеності трубопроводу і дозволяє підійти до вирішення проблеми оптимізації режимів роботи об'єктів ЕХЗ магістральних трубопроводів в умовах факторів, що змінюються в часі та за довжиною траси [3, 7, 8, 12].

З метою оптимізації процесу, зокрема, при врахуванні таких факторів, як характеристики ґрунту, корозійно-небезпечні зони тощо, доцільно розділити всю контрольовану зону лінійного виробничого управління магістральних трубопроводів на деякі досліджувані ділянки або модулі автоматизації (МА) з кількістю СКЗ, наприклад, до 15–20 одиниць. Для кожного МА, крім СКЗ, обираються контрольні точки з дистанційними контрольно-вимірювальними пунктами (ДКВП) з телемеханікою, які розташовані близько до середини між сусідніми СКЗ, у корозійно-небезпечних зонах, у зонах блукаючих струмів тощо. Цей підготовчий етап для впровадження методу використовується один раз при формуванні нового МА і є типовим. На цьому етапі методу здійснюється «налаштування» МА або його прив'язка до відповідної ділянки магістрального трубопроводу (МТ) та необхідних даних, зокрема: контрольних точок, де встановлені СКЗ та КВП; технічних характеристик СКЗ; характеристик ґрунту; корозійно-небезпечних зон; сезонних умов роботи СКЗ;

граничних значень потенціалу «труба-грунт» у контрольних точках тощо [12, 14].

Таким чином для забезпечення безперервного контролю параметрів електрохімічного захисту (ЕХЗ) та оперативного виявлення недо захищених ділянок магістрального трубопроводу пропонується розробити трирівневу структуру інформаційно-вимірювальної системи. Така архітектура дозволяє розподілити функції збору, первинної обробки та візуалізації даних (рис. 3.1).

1. Нижній рівень (первинні перетворювачі)

Нижній рівень призначений для безпосереднього вимірювання електрохімічних параметрів трубопроводу та включає:

- електроди порівняння тривалої дії типу МСЕ-ТД;
- датчики напруги;
- датчики струму захисту;
- вузли первинного перетворення сигналів.

Основним контрольованим параметром є захисний потенціал трубопроводу відносно електрода порівняння. Для забезпечення достовірності вимірювань вхідний опір вимірювального каналу повинен бути не меншим за 10 МОм, що мінімізує вплив вимірювального пристрою на режим роботи контрольованого об'єкта.

Діапазон вимірювання потенціалу доцільно приймати від -2 до $+2$ В, що забезпечує контроль як нормальних, так і аварійних режимів роботи системи електрохімічного захисту.

Для контролю режиму роботи станції катодного захисту додатково здійснюється вимірювання сили захисного струму за допомогою прецизійного шунта або спеціалізованого датчика струму.

2. Середній рівень (контролерний)

Середній рівень реалізується на базі мікроконтролерного модуля телеметрії, побудованого, наприклад, на платформі STM32 або її аналогах.

Основними функціями контролерного рівня є:

- оцифровування аналогових сигналів;

- попередня обробка результатів вимірювань;
- фільтрація перешкод промислової частоти 50 Гц;
- архівування даних;
- передача інформації до диспетчерського центру.

Для підвищення точності вимірювань рекомендується використовувати аналого-цифровий перетворювач розрядністю не менше 16 біт. При діапазоні вимірювання ± 2 В теоретичний крок квантування становить:

$$\Delta U = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{2^N}, \quad (3.1)$$

де $U_{\max} - U_{\min}$ — повний діапазон вимірювання АЦП, В;

N — розрядність АЦП, біт.

Для діапазону вимірювання $\pm 2 \text{ В}$ та розрядності 16 біт:

$$\Delta U = \frac{2 - (-2)}{2^{16}} = \frac{4}{65536} = 6.1 \times 10^{-5} \text{ В} \quad \text{або} \quad \Delta U = 0.061 \text{ мВ}.$$

Отримане значення є значно меншим за допустиму похибку вимірювання захисного потенціалу (± 10 мВ), що свідчить про достатню роздільну здатність обраного АЦП для задач дистанційного моніторингу систем електрохімічного захисту.

Передача даних між віддаленими пунктами контролю та сервером може здійснюватися за допомогою технологій GSM/LTE, NB-IoT або LoRaWAN залежно від особливостей об'єкта та вимог до дальності зв'язку.

3. Верхній рівень (Диспетчерський)

Верхній рівень представлений сервером збору та обробки даних, а також автоматизованими робочими місцями операторів.

Функціональні можливості верхнього рівня включають:

- централізований збір вимірювальної інформації;
- довготривале архівування даних;
- візуалізацію поточних та історичних параметрів;

побудову трендів зміни потенціалів і струмів;
 формування аварійних повідомлень;
 автоматичний контроль відповідності параметрів вимогам нормативної документації [16].

Застосування SCADA-системи дозволяє забезпечити оперативне виявлення відхилень режимів роботи електрохімічного захисту та своєчасне прийняття управлінських рішень у разі виходу захисного потенціалу за межі нормативного діапазону (від $-0,85$ В до $-1,15$ В).

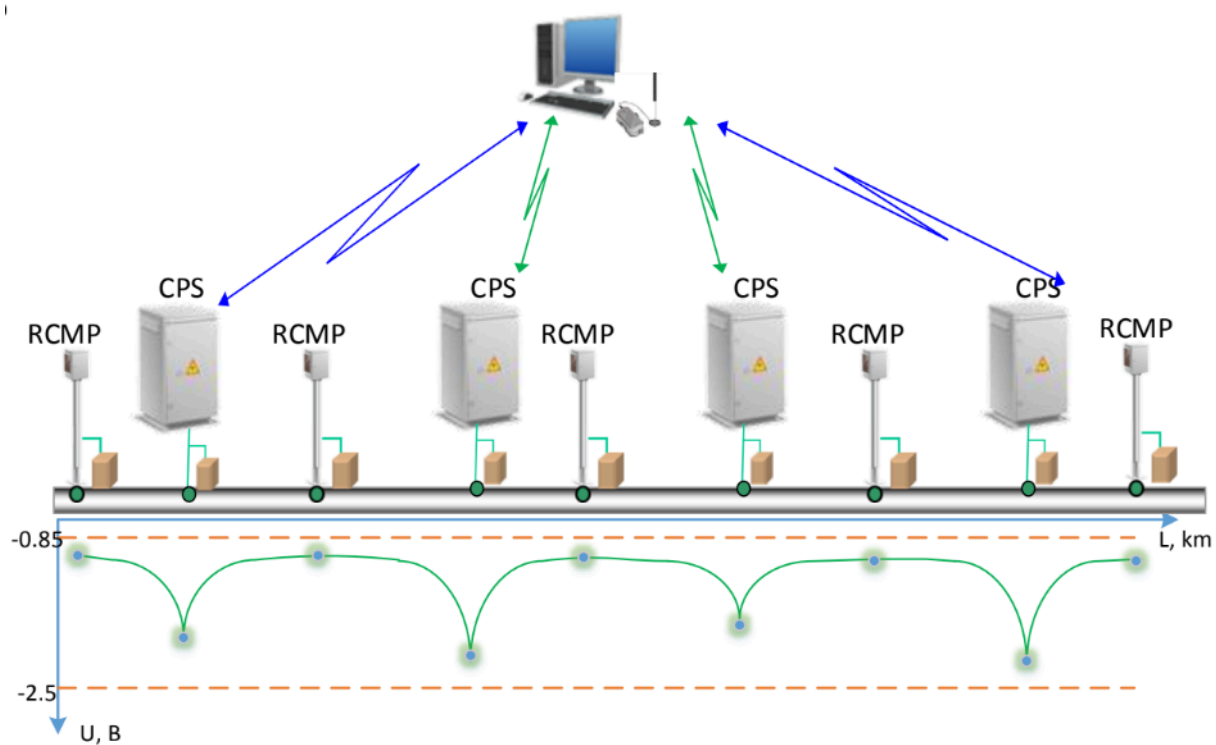


Рисунок 3.1 - Схема трирівневої системи дистанційного моніторингу ЕХЗ підземних трубопроводів

Алгоритм роботи інтелектуального модуля ЕХЗ

Алгоритм замкненого циклу керування (Closed-loop control) реалізує покроковий аналіз стану захищеності трубопроводу [16]:

Збір даних: Синхронне опитування датчиків струму, напруги та зняття значень U_i з електродів порівняння.

Фільтрація: Очищення сигналів від наведеної змінної напруги 50 В за допомогою цифрових алгоритмів DSP в мікроконтролері.

Перевірка умов: Порівняння отриманих значень U_i з критичними межами від -0,85 В до -1,15 В.

Корекція режиму: якщо зафіксовано $U_i > -0,85\text{В}$ (зона недозахисту) контролер розраховує новий вектор струмів і через ШІМ-модуляцію збільшує вихідну потужність СКЗ.

Якщо зафіксовано $U_i < -1,15\text{ В}$ (небезпека перезахисту) струм СКЗ автоматично зменшується для економії електроенергії та захисту ізоляції від відшарування.

Телеметрія: Передача масиву даних через радіомодем (LoRaWAN/NB-IoT) на сервер SCADA та перехід у режим мікроспоживання до наступного такту вимірювань.

3.2 Моделювання розподілу захисного потенціалу СКЗ та розрахунок їх взаємного розміщення

В Україні на магістральних та розподільних трубопроводах (нафтопроводи, газопроводи, продуктопроводи) станції катодного захисту (СКЗ) найчастіше розташовують на відстані **від 10 до 30 кілометрів одна від одної**.

Однак це усереднений показник, і точна відстань (яку в інженерії називають **довжиною зони захисту** або **плечем захисту СКЗ**) завжди розраховується індивідуально для кожної ділянки траси. Вона залежить від кількох ключових технічних та природних факторів [11].

Стан та тип ізоляційного покриття (найважливіший фактор):

Нові трубопроводи із сучасним тришаровим поліетиленовим або епоксидним покриттям мають дуже високий перехідний опір. Струм захисту практично не витікає в землю, тому одна СКЗ може ефективно захищати ділянку довжиною **до 30–40 км** (а в ідеальних умовах навіть більше).

Старі трубопроводи (наприклад, збудовані за радянських часів із бітумно-мастиковою ізоляцією, яка з роками деградувала, потріскалася та натягнула вологу). Через значний витік струму потенціал швидко згасає. На таких ділянках СКЗ змушені ставити значно частіше — кожні **5–12 км**.

Питомий електричний опір ґрунту:

У ґрунтах із високим опором (піски, сухі чорноземи, скелясті породи) струм поширюється гірше, але й корозійна активність середовища нижча.

У вологих, високопровідних ґрунтах з низьким опором (солончаки, болотисті місцевості, заплави річок) струм стікає з труби дуже інтенсивно. У таких "агресивних" зонах відстань між СКЗ скорочують, щоб підтримати стабільний потенціал.

Діаметр трубопроводу:

Що більший діаметр труби (наприклад, магістральні газопроводи діаметром 1020, 1220 або 1420 мм), то більша площа її поверхні контактує з ґрунтом. Відповідно, для її захисту потрібна більша сила струму, а згасання потенціалу відбувається швидше, що змушує зменшувати крок між СКЗ.

Наявність блукаючих струмів:

У місцях перетину трубопроводів з електрифікованими залізницями (де діють блукаючі струми) або поблизу великих промислових вузлів, стандартний крок розташування порушується. Там СКЗ (або станції електродренажного захисту) ставлять точково — безпосередньо в осередках небезпеки.

Згідно з чинними нормативними документами (зокрема **ДСТУ Б В.2.5-30:2006** «Трубопроводи сталеві підземні магістральні. Протикорозійний захист»), головна вимога не сама відстань, а **забезпечення захисного потенціалу «труба-земля» в будь-якій точці**. Він повинен перебувати у суворому коридорі: **від -0,85 В до -1,15 В** (за мідно-сульфатним електродом порівняння) [4].

Тому при проєктуванні крок СКЗ обирають так, щоб на найвіддаленішій від станції точці (середині плеча між двома СКЗ) потенціал не піднімався вище за критичні -0,85 В.

Для контролю цього захисного потенціалу по всій довжині українських магістральних трубопроводів встановлюють КВП (контрольно-вимірювальні пункти). Нормативна відстань між самими КВП на трасі становить значно менше - переважно кожні 500–1000 метрів, а також обов'язково у місцях перетинів з дорогами, річками та на межах різних типів ґрунтів. Саме до цих КВП і підключаються сучасні модулі дистанційного моніторингу.

Отже, на ділянці трубопроводу призначаються контрольні точки для вимірювання потенціалу. До контрольних точок належать точки, де встановлені СКЗ та КВП, які розташовані близько до середини між сусідніми СКЗ, у корозійно-небезпечних зонах, у зонах блукаючих струмів тощо. У кожній точці трубопроводу значення потенціалу «труба-ґрунт» визначається суперпозицією потенціалів, накладених усіма або щонайменше кількома сусідніми СКЗ.

Щоб розрахувати суперпозицію потенціалів двох сусідніх СКЗ, змодельємо розподіл захисного потенціалу від однієї СКЗ.

Затухання захисного потенціалу вздовж трубопроводу відбувається за формулою:

$$U_x = U_0 e^{-\alpha x}, \quad (3.2)$$

де α - коефіцієнт затухання [11].

Моделювання розподілу захисного потенціалу здійснено в середовищі MatLAB (рис.3.2, дод. Б). Крива падіння потенціалу побудована в залежності від відстані x від точки дренажу СКЗ. Горизонтальними лініями на графіку позначено $U_{\min} = -0,85$ В та $U_{\max} = -1,15$ В. Точка перетину експоненти з лінією $-0,85$ В наочно показує довжину плеча захисту, де запропонована система моніторингу має зафіксувати потребу в регулюванні струму СКЗ.

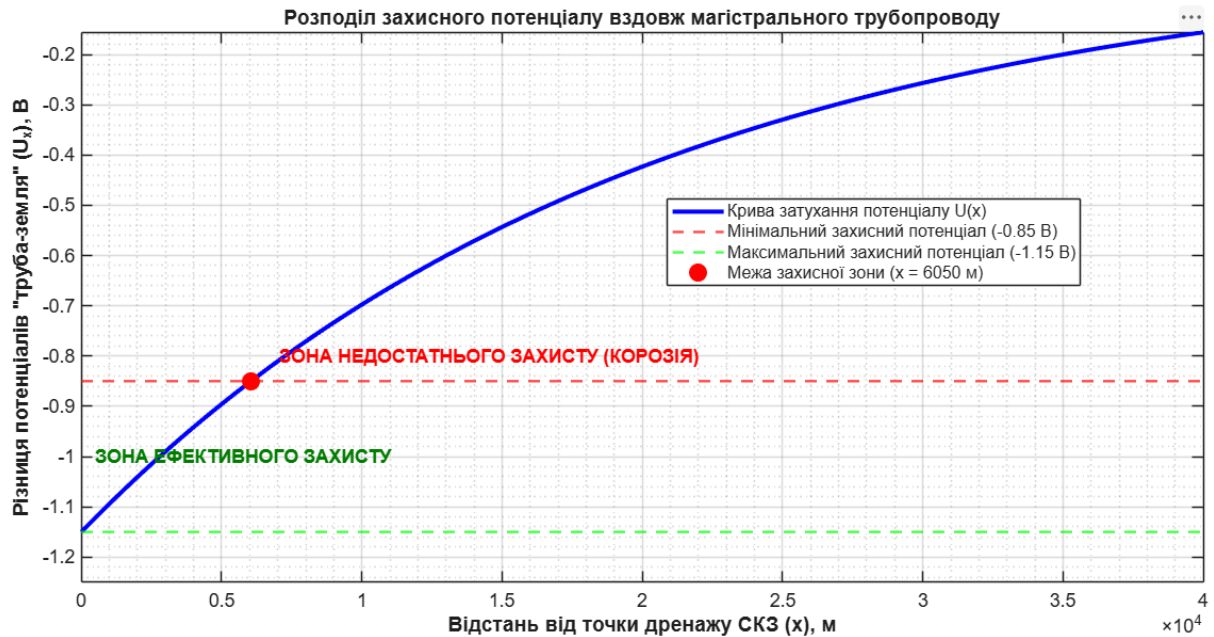


Рисунок 3.2 - Розподіл захисного потенціалу вздовж магістрального трубопроводу

В автоматичному режимі із застосуванням систем дистанційного корозійного моніторингу та керування потенціал «труба-грунт» U вимірюється в i -х контрольних точках.

Обирається j -та базова СКЗ, для якої фіксуються поточні значення вихідного струму та вихідної напруги.

Дистанційно забезпечують режим переривання захисних струмів інших СКЗ (ліворуч і праворуч від базової з обраним кроком, тобто 1, 2, 3 сусідні станції) і вимірюють потенціал «труба-грунт» у контрольних точках, який є захисним зміщенням у контрольній точці, викликаним j -ю СКЗ.

Для інженерного розрахунку максимальної відстані між двома сусідніми станціями ($L_{\max}$) скористаємося двома концепціями: принципом суперпозиції (взаємного впливу) та експоненційним законом затухання потенціалу.

Нехай ми маємо дві сусідні станції - СКЗ₁ та СКЗ₂, відстань між якими дорівнює L . Найбільш критичною точкою є середина відрізка між ними ($x=L/2$), оскільки саме тут захисний потенціал згасає сильніше за все (рис. 3.3).

Згідно з концепцією суперпозиції полів, захисне зміщення потенціалу в будь-якій i -й точці є сумою полів, накладених сусідніми станціями і посередині між двома СКЗ (при $x=L/2$) становить [11]:

$$U_1 = U_2 = U_0 e^{-\alpha L/2}. \quad (3.3)$$

Сумарний потенціал:

$$U_{\Sigma} = 2U_0 e^{-\alpha L/2}. \quad (3.4)$$

Для забезпечення захисту в точці найменшого потенціалу між станціями необхідно забезпечити умову:

$$U_{\Sigma} \geq U_{min}, \quad (3.5)$$

де U_{min} - мінімально допустимий захисний потенціал.

Звідси максимальна відстань між СКЗ

$$L_{max} = \frac{2}{\alpha} \ln\left(\frac{2U_0}{U_{min}}\right). \quad (3.6)$$

Підставимо числові значення:

ефективний потенціал біля дренажу $U_0=1,2$ В;

мінімально допустимий потенціал $U_{min}=0,85$ В;

коефіцієнт затухання $\alpha=0,08$ км⁻¹.

Тоді

$$L_{max} = \frac{2}{0,08} \ln\left(\frac{2 \cdot 1,2}{0,85}\right) = 25,25 \text{ (км)}.$$

Висновок розрахунку: За поточного стану ізоляційного покриття та параметрів ґрунту, станції катодного захисту повинні бути розташовані на відстані не більше 25,2 км одна від одної. Якщо відстань буде більшою, посередині ділянки (на 12,6 км від кожної станції) потенціал підніметься вище за -0,85 В і система моніторингу зафіксує аварійну зону «недозахисту».

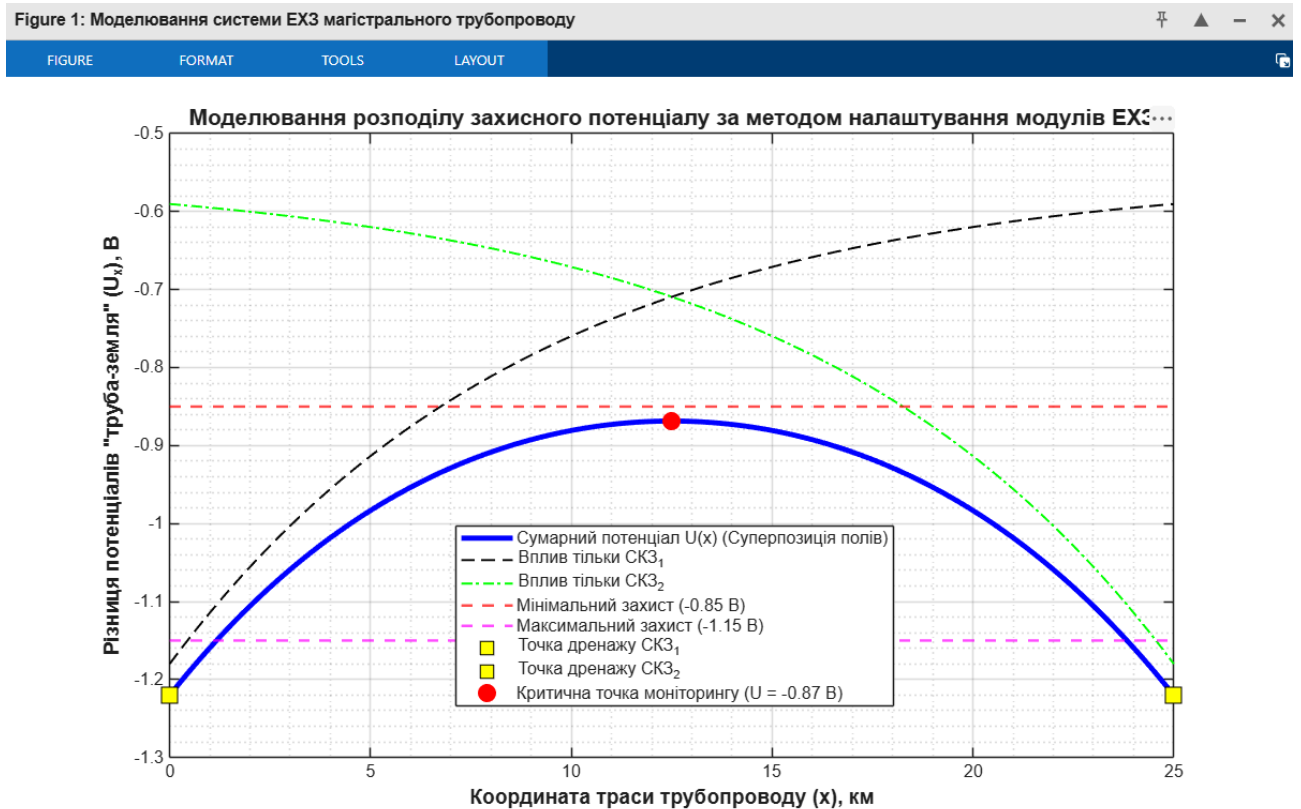


Рисунок 3.3 - Моделювання розподілу захисного потенціалу із врахуванням взаємного впливу двох сусідніх СКЗ

3.3. Оцінювання метрологічних характеристик системи моніторингу

Для забезпечення достовірності телеметричної інформації загальна зведена похибка вимірювального каналу системи моніторингу ($\gamma_{\text{сист}}$) не повинна перевищувати регламентованого значення $\leq 2\% \dots 5\%$. Оскільки вимірювальний тракт складається з кількох послідовних ланок, загальна похибка розраховується за принципом геометричного додавання випадкових незалежних величин:

$$\gamma_{\text{сист.}} = \sqrt{\gamma_{\text{дав.}}^2 + \gamma_{\text{АЦП}}^2 + \gamma_{\text{лін.}}^2}, \quad (3.7)$$

де $\gamma_{\text{дав.}}$ - похибка первинного датчика потенціалу (електрода порівняння та узгоджувального каскаду);

$\gamma_{\text{АЦП}}$ - похибка аналого-цифрового перетворювача (включаючи похибку квантування та інтегральну нелінійність);

$\gamma_{\text{лін.}}$ - похибка, обумовлена падінням напруги та наведенням завад у лінії зв'язку від КВП до контролера.

Для реалізації запропонованої системи обрано такі компоненти:

Вимірювальний перетворювач потенціалу з основною похибкою $\gamma_{\text{дав.}} = 1,0\%$.

Вбудований в мікроконтролер STM32 12-розрядний АЦП. Похибка АЦП ($\gamma_{\text{АЦП}}$) з урахуванням температурного дрейфу опорної напруги та похибки дискретизації становить близько $\gamma_{\text{АЦП}}=0,5\%$.

Екранована лінія зв'язку «кручена пара» довжиною до 10 м, для якої зведена похибка від наведених перешкод та падіння напруги оцінюється як $\gamma_{\text{лін}}=0,3\%$.

Підставимо значення у математичну модель:

$$\gamma_{\text{сист.}} = \sqrt{1,0^2 + 0,5^2 + 0,3^2} \approx 1,16\%.$$

Таким чином отримана загальна похибка системи $\gamma_{\text{сист}} \approx 1,16\%$ повністю задовольняє жорсткі технічні вимоги ($\leq 2\%$), що підтверджує правильність вибору елементної бази середнього рівня та доцільність використання обраного типу АЦП.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі розроблено структуру інформаційно-вимірювальної системи дистанційного моніторингу параметрів електрохімічного захисту магістральних трубопроводів. Запропонована система побудована за трирівневою архітектурою та включає нижній рівень первинних перетворювачів, середній рівень телеметричного контролера на базі мікроконтролера STM32 та верхній рівень диспетчерського керування на основі SCADA-системи. На відміну від традиційних систем моніторингу, запропонований підхід передбачає дистанційний контроль не лише станцій катодного захисту, а й контрольно-вимірювальних пунктів, розташованих у корозійно-небезпечних зонах та між сусідніми СКЗ, що дозволяє підвищити достовірність оцінювання захищеності трубопроводу.

Проведено моделювання розподілу захисного потенціалу вздовж трубопроводу на основі експоненційного закону згасання та принципу суперпозиції потенціалів сусідніх станцій катодного захисту. Встановлено, що за прийнятих параметрів системи та коефіцієнта згасання $\alpha = 0,08 \text{ км}^{-1}$ максимальна допустима відстань між сусідніми СКЗ становить близько 25,2 км. Отримані результати підтверджують необхідність організації дистанційного контролю потенціалу в контрольних точках, розташованих між станціями катодного захисту, для своєчасного виявлення зон недозахисту.

Розроблено алгоритм автоматичного керування режимами роботи електрохімічного захисту, який реалізує замкнений цикл регулювання на основі безперервного аналізу потенціалу «труба-грунт». Алгоритм забезпечує автоматичне коригування вихідного струму СКЗ залежно від фактичного рівня захисного потенціалу та передачу телеметричної інформації на диспетчерський рівень у режимі реального часу.

Виконано оцінювання метрологічних характеристик вимірювального каналу системи. Встановлено, що при використанні вимірювального перетворювача з похибкою 1 %, 12-розрядного АЦП мікроконтролера STM32 та

екранованої лінії зв'язку загальна зведена похибка системи становить близько 1,16 %, що не перевищує допустимого значення 2 %. Отриманий результат підтверджує правильність вибору елементної бази та можливість використання запропонованої системи для високоточного дистанційного контролю параметрів електрохімічного захисту магістральних трубопроводів.

Дані результати підтверджують технічну реалізованість і доцільність впровадження розробленої системи дистанційного моніторингу, яка забезпечує підвищення ефективності електрохімічного захисту, зменшення ризику розвитку корозійних пошкоджень та створює передумови для переходу до інтелектуального керування режимами роботи станцій катодного захисту.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Охорона праці при роботі із розробленою системою

Експлуатація системи дистанційного моніторингу параметрів електрохімічного захисту магістральних трубопроводів повинна здійснюватися відповідно до вимог Закону України «Про охорону праці», Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів (НПАОП 40.1-1.21-98), Правил безпечної експлуатації електроустановок (НПАОП 40.1-1.01-97), Правил улаштування електроустановок (ПУЕ) та Правил експлуатації електрозахисних засобів (НПАОП 40.1-1.07-01). Під час виконання робіт з технічного обслуговування станцій катодного захисту, контрольно-вимірювальних пунктів та телеметричного обладнання працівники повинні пройти відповідне навчання, інструктаж з охорони праці та мати кваліфікаційну групу з електробезпеки не нижче III [17 - 22].

Усі роботи в діючих електроустановках повинні виконуватися за нарядом-допуском або розпорядженням із застосуванням організаційних та технічних заходів безпеки. Перед початком робіт необхідно виконати відключення обладнання від джерел живлення, перевірити відсутність напруги, встановити переносні заземлення та вивісити попереджувальні плакати. Доступ до шаф керування, випрямлячів СКЗ та комутаційного обладнання дозволяється лише уповноваженому персоналу.

Для захисту персоналу від ураження електричним струмом необхідно використовувати справні електрозахисні засоби: діелектричні рукавички, діелектричне взуття, ізолювальні штанги, покажчики напруги та переносні заземлення. Усі засоби захисту повинні проходити періодичні випробування та перевірки відповідно до встановлених норм.

Станції катодного захисту повинні бути обладнані захисним заземленням, пристроями захисту від коротких замикань та перенапруг, а також мати відповідне маркування небезпечних зон. Електронне обладнання

телеметрії необхідно розміщувати у герметичних шафах із класом захисту не нижче IP54 для запобігання впливу атмосферних опадів, пилу та конденсату.

Особливу увагу слід приділяти роботам на трасі трубопроводу. Під час виконання вимірювань у контрольно-вимірювальних пунктах працівники повинні використовувати сигнальний одяг підвищеної видимості, а у випадку проведення робіт поблизу автомобільних доріг додатково встановлювати попереджувальні знаки та огороження робочої зони [17 - 22].

Запропонована система дистанційного моніторингу дозволяє суттєво підвищити рівень безпеки праці за рахунок скорочення кількості виїздів персоналу до об'єктів електрохімічного захисту та виконання більшості контрольних операцій у дистанційному режимі. Крім того, безперервний контроль захисного потенціалу дає можливість своєчасно виявляти аварійні режими роботи СКЗ та запобігати виникненню корозійних пошкоджень трубопроводів, що сприяє підвищенню техногенної та екологічної безпеки об'єкта.

4.2 Забезпечення безпеки технологічних процесів, монтажу та експлуатації обладнання

З метою забезпечення технологічного процесу, монтажу та експлуатації приладу необхідно дотримуватись наступних вимог:

– до монтажу, огляду, експлуатації, технічного обслуговування, ремонту і випробувань приладу допускаються особи, які досягли вісімнадцятирічного віку, вивчили технічний опис та інструкцію по техніці безпеки при роботі електротехнічними установками та радіо-електричною апаратурою, пройшли медичний огляд, пройшли навчання, інструктаж з питань охорони праці, у тому числі при виконанні робіт з підвищеною небезпекою, подання першої допомоги потерпілим від нещасних випадків, про правила поведінки при виникненні аварій;

- особи, що здійснюють монтаж, ремонт та експлуатацію контрольно-вимірювальних приладів і автоматики, зобов'язані уміти користуватися засобами колективного та індивідуального захисту, дотримуватися зобов'язань з охорони праці, передбачених колективним договором (угодою, трудовим договором) та правилами внутрішнього трудового розпорядку підприємства, у тому числі: своєчасно розпочинати і закінчувати роботу, дотримуватися технологічної та обідньої перерв, не виконувати роботи, непередбачені змінним завданням, не знаходитися на робочому місці у позаробочий час і без дозволу відповідного керівника.

- всі вимірювальні прилади, які використовують для знаходження полумок, огляду і інших роботах, повинні мати надійне заземлення;

- всі види технологічного обслуговування, які пов'язані з перепайкою елементів, розпайкою кабелів, проводів і іншого, приводиться тільки при відключеному приладі;

- не допускається експлуатація обладнання з нещільно вставленим роз'єднувачем і з неущільненими кабелями;

- У випадку виникнення пожежі необхідно вимкнути всі види вентиляції, включити пожежну сигналізацію, негайно розпочати гасіння наявними засобами пожежогасіння і повідомити за телефоном 101 у пожежну охорону.

- У випадку травмування (отруєння) працівник повинен вжити заходів щодо надання необхідної допомоги потерпілому при нещасних випадках до прибуття лікаря.

Безпечність експлуатації при нормальних режимах роботи електроустановок забезпечується наступними захисними заходами: застосування ізоляції, недоступність струмопровідних частин, методи орієнтації, застосування малих напруг, ізоляцією електричних мереж від землі, компенсацією ємностей складових струму замикання на землю, вирівнювання потенціалів та застосування ізолюючих ділянок.

Одним з найефективніших захистів є захисне заземлення. Захисним заземленням називають заземлюючі прилади, призначені для з'єднання металічних частин електрообладнання, які не знаходяться під напругою, з землею безпосередньо металічним провідником – заземлювачем. Призначення захисного заземлення – знизити до безпечної величини напругу відносно землі, яка виникає безпосередньо на металічних частинах електроустановки та в іншій апаратурі у випадку пробоя, або пошкодження ізоляції провідників, несучих робочий струм. Технічні засоби захисту приведені в таблиці 6.

Таблиця 4.1 – Технічні засоби захисту

Небезпечні фактори виробничого середовища	Засоби та заходи захисту	Технічна характеристика пристрою або засобу	Місце встановлення на плані або агрегаті, терміни використання
Небезпека електро-травматизму	Ізоляція	Опір ізоляції не менше 0,5 МОм	Встановлюється на струмоведучих елементах
	Захисне заземлення	Опір захисного заземлення менший або рівний 10 Ом	Заземлюється прилад та інше електрообладнання

4.3 Розрахунок захисного заземлення

Прилад живиться від електромережі напругою 220 В. Вимірний питомий опір ґрунту $\rho_v = 90 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Вимірювання відбувалось при сухому ґрунті.

Найбільший допустимий опір захисного заземлення в електроустановках з напругою до 1000 В, потужністю, що не перевищує 100 кВт (згідно ПУЕ), не перевищує 10 Ом. Заземлення виконуємо з стержнів діаметром 10 мм і довжиною 2 метри.

Розрахунковий питомий опір ґрунту:

$$\rho_{\text{роз}} = \rho_v \cdot \psi, \quad (4.1)$$

де ρ_v – вимірний опір ґрунту, ψ – кліматичний коефіцієнт.

З таблиці питомих електричних опорів ґрунтів і кліматичних коефіцієнтів [20] визначаємо кліматичний коефіцієнт для сухого ґрунту $\psi = 1,4$.

Розрахунковий питомий опір ґрунту:

$$\rho_{\text{роз}} = 90 \cdot 1,4 = 126 \text{ Ом}\cdot\text{м}.$$

Опір заглибленого вертикального заземлювача знаходимо за формулою:

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \ln \ln \frac{4H+l}{4H-l} \right), \quad (4.2)$$

де ρ – питомий опір ґрунтів, l – довжина стержня, d – діаметр, H – відстань від поверхні до середини заземлювача.

Підставляючи в формулу (5.2) числові значення $\rho = 126 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $l = 3 \text{ м}$, $d = 0,01 \text{ м}$, $H = 2 \text{ м}$ отримаємо опір розтікання струму одиничного заземлювача:

$$R = \frac{126}{2 \cdot \pi \cdot 3} \left(\ln \ln \frac{2 \cdot 3}{0,01} + \frac{1}{2} \ln \ln \frac{4 \cdot 2 + 3}{4 \cdot 2 - 3} \right) = 14,28 \text{ Ом}.$$

Необхідну кількість паралельно з'єднаних заземлювачів визначимо з формули:

$$n = \frac{R_1}{R_{\text{ш}} \cdot \eta_3}, \quad (4.3)$$

де R_1 – опір розтікання струму одного заземлювача, $R_{\text{ш}}$ – максимально допустимий опір усіх штучних заземлювачів, η_3 – коефіцієнт використання заземлювачів, в якому враховується їх взаємне екранування.

Для визначення коефіцієнта потрібно задати конфігурацію розташованих заземлювачів.

Розглянемо випадок, коли вертикальні стержні розташовані по контуру квадрата $6 \times 6 \text{ м}$. Якщо відстань між заземлювачами складає 2 м , то по периметру квадрата можна розмістити 8 стержнів. В якості з'єднувальної смуги використовуємо сталюну шину $30 \times 5 \text{ мм}$. Довжина з'єднувальної шини визначається периметром квадрата $6 \times 6 \text{ метрів}$ і рівна 24 м .

Опір розтікання струму шини визначається за формулою для обчислення опору горизонтального заглибленого заземлювача:

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{2l^2}{bH}, \quad (4.4)$$

де ρ – питомий опір ґрунту, l – довжина заземлювача, H – віддаль від поверхні до заземлювача, b – ширина заземлювача.

Опір з'єднуючої шини :

$$R = \frac{126}{2\pi \cdot 24} \ln \frac{2 \cdot 24^2}{0.04 \cdot 0.7} = 8.878 \text{ Ом.}$$

Так як відношення відстані між вертикальними стержнями до їх довжини рівне одиниці, число заземлювачів $k = 8$, то коефіцієнт використання горизонтальної з'єднуючої смуги:

$$R_r = \frac{8.878}{0.028} = 32,881 \text{ Ом.}$$

Вертикальні стержні і горизонтальну шину розглядаємо як два паралельно з'єднаних опори. Тоді необхідний сумарний опір вертикальних заземлювачів знаходиться з умови:

$$R_{вз} \leq \frac{R_r \cdot R_d}{R_r + R_d}, \quad (4.5)$$

де $R_{вз}$ – опір розтікання струму вертикальних заземлювачів, R_r – опір розтікання струму з'єднуючої шини, R_d – максимально допустимий опір заземлюючого пристрою.

$$R_{вз} \leq \frac{32,881 \cdot 10}{32,881 + 10} = 7,68 \text{ Ом.}$$

Опір заземлювачів, розміщених по контуру квадрата 6×6 м не перевищує максимально допустимого значення 10 Ом.

4.4 Пожежна безпека та безпека в надзвичайних ситуаціях

Пожежна безпека системи дистанційного моніторингу параметрів електрохімічного захисту магістральних трубопроводів забезпечується комплексом організаційних та технічних заходів, спрямованих на запобігання

виникненню пожеж, обмеження їх поширення та захист персоналу і матеріальних цінностей. Відповідно до Кодексу цивільного захисту України та Правил пожежної безпеки в Україні, експлуатація електронного обладнання повинна здійснюватися з дотриманням вимог електро- та пожежної безпеки.

Основними причинами виникнення пожежі під час експлуатації системи дистанційного моніторингу можуть бути:

- коротке замикання в колах живлення серверного, телекомунікаційного та вимірювального обладнання;
- перевантаження електричної мережі внаслідок підключення несправного або надлишкового обладнання;
- перегрівання елементів електронних пристроїв через несправність систем вентиляції або накопичення пилу;
- пошкодження ізоляції кабелів живлення та ліній зв'язку;
- виникнення перенапруг у мережі живлення внаслідок грозових явищ або аварійних режимів роботи електромережі;
- порушення правил експлуатації електрообладнання та недотримання вимог пожежної безпеки персоналом.

Приміщення диспетчерського пункту, в якому розміщуються автоматизовані робочі місця операторів, серверне обладнання та засоби телеметрії, відповідно до вимог пожежної безпеки належить до категорії В за вибухопожежною та пожежною небезпекою. Основне пожежне навантаження створюють кабельна продукція, ізоляційні матеріали, пластикові корпуси електронних пристроїв та офісне обладнання.

Для запобігання виникненню пожеж передбачається виконання таких заходів:

- застосування сертифікованого електротехнічного обладнання та кабельної продукції;
- використання автоматичних вимикачів і пристроїв захисного відключення;

- організація захисного заземлення обладнання відповідно до вимог ПУЕ;
- встановлення пристроїв захисту від імпульсних перенапруг;
- регулярне технічне обслуговування серверного та телекомунікаційного обладнання;
- забезпечення вільного доступу до засобів пожежогасіння та евакуаційних виходів;
- проведення інструктажів персоналу з питань пожежної безпеки та дій у надзвичайних ситуаціях.

У разі виникнення пожежі персонал повинен негайно повідомити пожежно-рятувальну службу за номером 101, відключити електроживлення обладнання, організувати евакуацію людей та розпочати гасіння осередку загоряння первинними засобами пожежогасіння без ризику для власного життя та здоров'я.

Для ліквідації можливих загорянь приміщення повинно бути забезпечене первинними засобами пожежогасіння відповідно до вимог Правил пожежної безпеки в Україні.

Таблиця 4.2 – Первинні засоби пожежогасіння

Приміщення	Категорія за пожежною небезпекою	Площа, м ²	Первинні засоби пожежогасіння
Диспетчерський пункт та приміщення серверного обладнання	В	40–60	Вуглекислотний вогнегасник ВВК-3, порошковий вогнегасник ОП-5, пожежне покривало, аптечка першої допомоги

Застосування системи дистанційного моніторингу сприяє підвищенню рівня безпеки в надзвичайних ситуаціях, оскільки дозволяє своєчасно виявляти аварійні режими роботи станцій катодного захисту, здійснювати контроль їх технічного стану в режимі реального часу та мінімізувати необхідність перебування персоналу на віддалених виробничих об'єктах.

ВИСНОВКИ

У бакалаврській роботі розглянуто актуальну проблему підвищення ефективності протикорозійного захисту магістральних нафтогазопроводів шляхом удосконалення системи дистанційного моніторингу електрохімічного захисту. Проведені дослідження та виконані розрахунки дозволили отримати такі результати:

Проаналізовано основні причини відмов магістральних нафтогазопроводів та встановлено, що корозійні процеси є домінуючим фактором аварійності. Показано, що зовнішня ґрунтова корозія, електрокорозія під дією блукаючих струмів та корозійне розтріскування під напругою становлять найбільшу загрозу для надійності трубопровідних систем.

Виконано аналіз сучасних методів захисту підземних трубопроводів від корозії. Встановлено, що найбільш ефективним підходом є комплексне застосування пасивного захисту у вигляді ізоляційних покриттів та активного електрохімічного захисту, ефективність якого значною мірою залежить від якості контролю та своєчасного регулювання режимів роботи.

Розглянуто основні етапи проєктування систем електрохімічного захисту відповідно до чинних нормативних документів. Виконано розрахунок параметрів катодного захисту для ділянки магістрального нафтопроводу діаметром 820 мм та довжиною 1000 км за питомого опору ґрунту 60 Ом·м.

За результатами розрахунків визначено основні параметри станції катодного захисту. Встановлено, що для забезпечення нормативного захисного потенціалу доцільно застосувати станцію катодного захисту типу СКЗ-500 з потужністю 0,5 кВт, робочою напругою 10–50 В та максимальним струмом 10 А. Розрахована довжина зони захисту однієї станції становить близько 13,3 км. Обрана відстань між сусідніми СКЗ становить 25 км.

Визначено параметри анодного заземлення, оптимальну кількість електродів та характеристики дренажного кола. Отримані результати

підтвердили можливість забезпечення стабільної роботи системи катодного захисту протягом нормативного терміну експлуатації.

Розроблено трирівневу архітектуру системи дистанційного моніторингу електрохімічного захисту, яка включає рівень первинних вимірювальних перетворювачів, контролерний рівень та диспетчерський центр збору й обробки даних. Запропонована структура забезпечує безперервний контроль захисного потенціалу трубопроводу, струму та напруги станцій катодного захисту.

Запропоновано алгоритм автоматизованого керування режимами роботи системи електрохімічного захисту на основі аналізу поточних значень потенціалу «труба-земля». Реалізація замкненого циклу керування дозволяє автоматично коригувати вихідні параметри станцій катодного захисту, запобігати виникненню зон недозахисту та перезахисту, а також зменшувати енергоспоживання.

Проведено оцінювання метрологічних характеристик системи моніторингу. Показано, що використання 16-розрядного аналого-цифрового перетворювача забезпечує роздільну здатність вимірювань значно вищу за нормативно допустиму похибку контролю захисного потенціалу, що гарантує необхідну точність вимірювань.

Розглянуто питання охорони праці, електробезпеки, пожежної безпеки та безпеки в надзвичайних ситуаціях при експлуатації системи дистанційного моніторингу. Виконано розрахунок захисного заземлення, що забезпечує безпечні умови роботи обслуговуючого персоналу.

Таким чином, запропоновані технічні рішення забезпечують підвищення надійності роботи магістральних трубопроводів, зниження ризику корозійних пошкоджень, скорочення експлуатаційних витрат та створюють передумови для впровадження сучасних цифрових технологій управління об'єктами нафтогазового комплексу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Грудз, Я. В., Стасюк, Р. Б., Капушак, Я. С., Підлуський, В. П., Гамула, С. Б. & Сухарський, Б. М. (2025). Вплив природних факторів на інтенсивність стрес-корозії трубних сталей в процесі експлуатації газопроводів. *Нафтогазова енергетика*, 2(44), 204-213. doi: 10.31471/1993-9868-2025-2(44)-204-213.
2. ДСТУ Б В.2.5-30:2006. Трубопроводи сталеві підземні магістральні. Протикорозійний захист. Київ : Мінбуд України, 2006. 64 с.
3. ДСТУ EN 12954:2022. Катодний захист металевих конструкцій у ґрунтах або воді. Загальні принципи та застосування для трубопроводів. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022. 89 с.
4. ДСТУ 4219-2003. Трубопроводи сталеві магістральні. Загальні вимоги до захисту від корозії. Київ : Держспоживстандарт України, 2004. 27 с.
5. Глоба Я. М. Застосування електрометричних технологій для оцінки стану підземних комунікацій нафто-газової промисловості : кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису : дис. ... канд. геол. наук : 04.00.22 / Київський національний університет імені Тараса Шевченка. Київ, 2020. 180 с.
6. Ahmed N., Ahmed D. S., Mohammed H. K., Al-Mashhadani M. H. S., Hussain Z., Salam C., Mohammed A., Rahimi M., Yusop R., Yousif E. Inhibition of corrosion: mechanisms and classifications – an overview. *Al-Qadisiyah Journal of Pure Science*. 2020. Vol. 25, No. 2. P. 1–9. DOI: 10.29350/QJPS.2020.25.2.1072.
7. Peabody A. W. *Peabody's Control of Pipeline Corrosion*. 3rd ed. Houston : NACE International, 2019. 816 p.
8. Baeckmann W., Schwenk W., Prinz W. *Handbook of Cathodic Corrosion Protection*. 3rd ed. Oxford : Gulf Professional Publishing, 2014. 568 p.
9. Revie R. W. *Uhlig's Corrosion Handbook*. 4th ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2022. 1536 p.
10. Кодекс 2:2021. Газорозподільчі системи. Рекомендації щодо проектування, будівництва, контролювання за будівництвом, введення та

виведення з експлуатації газорозподільчих систем : Видання офіційне. Київ : [б. в.], 2021. 144 с.

11. Азюковський О. О. Потенціал підземного металевого трубопроводу сформований електротехнічною системою електрохімічного захисту. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 2014. № 44. С. 132–139.

12. Prokhorov O., Prokhorov V., Khussanov A., Khussanov Z., Kaldybayeva B., Turdybekova D. Optimization of the cathodic protection system for the main pipelines // *Radioelectronic and Computer Systems*. 2023. № 3 (107). P. 187–203. DOI: 10.32620/reks.2023.3.15.

13. Яворський А. В., Крижанівський Є. І., Грудз В. Я. Експлуатація та обслуговування систем трубопровідного транспорту. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2015. 412 с.

14. Крижанівський Є. І., Грудз В. Я., Михалків В. Б. Надійність і діагностика магістральних трубопроводів. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2011. 432 с.

15. Білецький В. С., Орловський В. М. Захист металевих споруд від корозії : навчальний посібник. Львів : Новий Світ-2000, 2018. 304 с.

16. Ратушний О. С., Мартинюк В. В. Системи дистанційного моніторингу об'єктів трубопровідного транспорту // *Нафтогазова енергетика*. 2021. № 2 (36). С. 62–70.

17. Про охорону праці : Закон України від 14.10.1992 р. № 2694-XII. Відомості Верховної Ради України. 1992. № 49. Ст. 668.

18. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів : НПАОП 40.1-1.21-98. Затв. наказом Держнаглядохоронпраці України від 09.01.1998 № 4, зареєстр. в Міністерстві юстиції України 10.02.1998 за № 93/2533. Київ, 1998.

19. Правила безпечної експлуатації електроустановок : НПАОП 40.1-1.01-97. Затв. наказом Держнаглядохоронпраці України від 06.10.1997 № 257. Київ, 1997.

20. Правила експлуатації електрозахисних засобів : НПАОП 40.1-1.07-01. Затв. наказом Міністерства праці та соціальної політики України від 05.06.2001 № 253. Київ, 2001.

21. Правила улаштування електроустановок. Вид. 4-те, перероб. й допов. Харків : Форт, 2017. 760 с.