

Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу

На правах рукопису



Костів Богдан Володимирович

УДК 681.2.08:621.370

**УДОСКОНАЛЕННЯ БЕЗКОНТАКТНОГО
ВИЗНАЧЕННЯ СТРУМІВ В СТІНКАХ ПІДЗЕМНИХ
ТРУБОПРОВІДІВ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ЇХ
ІЗОЛЯЦІЙНОГО ПОКРИТТЯ**

**Спеціальність 05.11.13 – Прилади і методи контролю
та визначення складу речовин**

**Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук**

*Цей примірник дисертації
ідентичний з висхідним
з іншими примірниками
дисертації, що були подані
до спец. ради 220.052.03
всімнім секретарем*

Науковий керівник:

**доктор технічних наук,
професор Кісіль І. С.**



Івано-Франківськ – 2010

*М. Дрангуча
18.05.2010р.*

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ВИЗНАЧЕННЯ СТРУМІВ У СТІНКАХ ПІДЗЕМНИХ ТРУБОПРОВОДІВ З МЕТОЮ ОЦІНКИ СТАНУ ЇХ ІЗОЛЯЦІЙНОГО ПОКРИТТЯ.....	12
1.1. Аналіз об'єкта контролю.....	13
1.2. Основні види вимірювань в процесі захисту підземних металевих трубопроводів від корозії.....	19
1.3. Контактні методи та засоби для дослідження стану ізоляційного покриття підземних трубопроводів і визначення струмів в їх стінках.....	21
1.4. Безконтактні методи та засоби для дослідження стану ізоляційного покриття підземних трубопроводів і визначення струмів в їх стінках.....	26
1.5. Аналіз відомих пристроїв для визначення струмів в стінках підземних трубопроводів.....	35
1.6. Обґрунтування напрямку дослідження.....	38
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ УДОСКОНАЛЕННЯ БЕЗКОНТАКТНОГО ВИЗНАЧЕННЯ СТРУМІВ В СТІНКАХ ПІДЗЕМНИХ ТРУБОПРОВОДІВ.....	41
2.1. Компоненти магнітного поля над підземними металевими трубопроводами із струмом в стінках.....	41
2.2. Спосіб безконтактного визначення струму в стінці підземного трубопроводу шляхом однократного вимірювання напруженості магнітного поля магнітними антенами без попередньої фіксації їх положення щодо осі цього трубопроводу.....	43

2.3. Отримання профілю напруженості магнітного поля над підземними трубопроводами з автоматичним визначенням координат точок вимірювання	51
2.3.1. Профілювання з використанням спеціальної конфігурації вимірювальних антен.....	51
2.3.2. Алгоритм згладжування даних при профілюванні з використанням трьох магнітних антен	54
2.3.3. Алгоритм проведення вимірювання та дискретизації даних при профілюванні з використанням трьох магнітних антен.....	57
2.4. Застосування нейромереж для безконтактного визначення струмів в стінках підземних трубопроводів.....	63
2.4.1. Розроблення нейромережі для контролю струму в стінці одного підземного трубопроводу	64
2.4.2. Розроблення нейромережі для безконтактного визначення струмів у стінках двох паралельних підземних трубопроводів	69
2.5. Визначення струмів у стінках підземних трубопроводів шляхом використання методики умовно-нормальних рівнянь.....	72
2.5.1. Визначення струму в стінках одного підземного трубопроводу шляхом використання методики умовно-нормальних рівнянь.....	73
2.5.2. Визначення струмів у стінках двох паралельних електрично з'єднаних трубопроводів шляхом використання методики умовно-нормальних рівнянь	76
2.6. Вимоги до системи безконтактного визначення струмів в стінках підземних трубопроводів	80
Висновки до розділу	82
РОЗДІЛ 3 УДОСКОНАЛЕНА СИСТЕМА ВИЗНАЧЕННЯ СТРУМІВ У СТІНКАХ ПІДЗЕМНИХ ТРУБОПРОВОДІВ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ЇХ ІЗОЛЯЦІЙНОГО ПОКРИТТЯ.....	84
3.1. Структурна схема удосконаленої системи визначення струмів у стінках підземних трубопроводів.....	85

3.2. Блоки і вузли удосконаленої системи визначення струмів у стінках підземних трубопроводів.....	89
3.2.1. Характерні особливості конструкції і електричних схем генератора сигналів КІ-1-Г системи КІ-1	90
3.2.2. Розроблення електричних схем і конструкції блока приймача КІ-1-П системи КІ-1	94
3.3. Особливості розроблення програмного забезпечення системи КІ-1 .	102
3.4. Методика проведення безконтактних вимірювань напруженостей магнітного поля над підземними трубопроводами розробленою системою.....	105
3.5. Опрацювання отриманих результатів вимірювань системою КІ-1	108
Висновки до розділу	109
РОЗДІЛ 4 МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ РОЗРОБЛЕНОЇ СИСТЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ СТРУМІВ В СТІНКАХ ПІДЗЕМНИХ ТРУБОПРОВОДІВ.....	111
4.1. Аналіз факторів впливу на точність результатів визначення струмів у стінках підземних трубопроводів	111
4.2. Методичні, інструментальні і сумарна похибки розробленої системи КІ-1 безконтактного визначення струмів у стінках підземних трубопроводів.....	114
4.2.1. Методичні похибки системи КІ-1.....	114
4.2.2. Інструментальні похибки системи КІ-1	117
4.2.3. Сумарна похибка системи КІ-1.....	125
4.3. Експериментальні дослідження похибок безконтактного визначення струмів в стінках підземних трубопроводів розробленою системою КІ-1	127
Висновки до розділу	130
РОЗДІЛ 5 ВИПРОБУВАННЯ РОЗРОБЛЕНОЇ СИСТЕМИ КІ-1 ВИЗНАЧЕННЯ СТРУМІВ У СТІНКАХ ПІДЗЕМНИХ ТРУБОПРОВОДІВ.....	132

5.1. Лабораторні випробування системи КІ-1	132
5.1.1 Методика проведення лабораторних випробувань системи КІ-1 ...	132
5.1.2 Аналіз результатів лабораторних випробувань	136
5.2. Польові випробування системи КІ-1	137
5.2.1. Методика проведення польових випробувань системи КІ-1.....	139
5.2.2. Аналіз результатів польових випробувань системи КІ-1.....	140
5.3. Промислові випробування системи КІ-1	142
5.3.1 Методики проведення промислових випробувань системи КІ-1....	142
5.3.2 Аналіз результатів промислових випробувань системи КІ-1	144
5.4. Загальний аналіз результатів випробувань розробленої системи КІ-1 і рекомендації щодо її використання.....	146
Висновки до розділу	147
ВИСНОВКИ	149
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	152
ДОДАТКИ	161

ВСТУП

Актуальність теми. Одним із найбільш розповсюджених видів постачання значної кількості природного газу, нафти і нафтопродуктів споживачам є підземний трубопровідний транспорт, надійність роботи якого залежить і від безпосередньо стану підземних трубопроводів. Як правило підземні нафтогазопроводи є ізольованими. Однак із різних причин (технологічних, геологічних, тривалої експлуатації тощо) стан ізоляційного покриття підземних трубопроводів погіршується, що приводить до корозії металу трубопроводів, в результаті чого погіршуються якісні характеристики лінійної частини трубопроводів, що в багатьох випадках є причиною аварій.

Тому оперативний і достовірний контроль стану ізоляційного покриття підземних трубопроводів є актуальною задачею для нафтогазовидобувних і нафтогазотранспортних підприємств України, особливо з урахуванням значної кількості підземних трубопроводів і тривалого часу їх експлуатації.

Існуючі методи і засоби оперативного контролю стану ізоляційного покриття, які базуються на безконтактному визначенні струмів у стінках підземних трубопроводів і оцінці характеру зміни цих струмів вздовж траси, не завжди задовольняють вимогам щодо продуктивності процесу безпосереднього визначення вказаних струмів (особливо для паралельних трубопроводів) і їх метрологічних характеристик. Вказане певною мірою викликає складнощі при загальній оцінці стану ізоляційного покриття певних ділянок підземних трубопроводів та при плануванні проведення ремонтних робіт цих ділянок трубопроводів.

Тому актуальним є підвищення точності і продуктивності процесу безконтактного визначення струмів в стінках підземних трубопроводів, що дозволить підвищити достовірність оцінки стану ізоляційного покриття цих трубопроводів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася відповідно до тематичного плану виконання науково-дослідної держбюджетної теми кафедри "Методи та прилади контролю якості і сертифікації продукції" (МПКЯ і СП) Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (ІФНТУНГ) „Удосконалення методів, систем та технологій контролю якості нафтогазових процесів” та держбюджетної теми ІФНТУНГ „Наукові основи розробки методів, систем і нормативної бази для вимірювання витрати та контролю обладнання і технологічних параметрів у нафтогазовій галузі” (0109U008878).

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є удосконалення безконтактного визначення струмів в стінках підземних трубопроводів шляхом підвищення точності і продуктивності процесу безконтактного визначення цих струмів.

Відповідно до цієї мети необхідно вирішити такі задачі:

- здійснити аналіз існуючих підходів щодо безконтактного визначення струмів в стінках підземних трубопроводів і щодо впливу різних факторів на процес визначення цих струмів;

- розробити удосконалений спосіб безконтактного визначення струму в стінці одного підземного трубопроводу на основі однократних вимірювань напруженості магнітного поля без необхідності розміщення магнітних антен в перпендикулярній до осі трубопроводу площині;

- розробити способи безконтактного визначення струмів в стінках підземних трубопроводів шляхом удосконалення методики отримання значень точок профілів горизонтальної складової напруженості магнітного поля та їх опрацювання з використанням штучних нейронних мереж та умовно-нормальних рівнянь;

- розробити удосконалену інформаційно-вимірювальну систему для безконтактного визначення струмів у стінках підземних трубопроводів з реалізацією в ній запропонованих способів визначення струмів;

- здійснити метрологічний аналіз розроблених способів і системи безконтактного визначення струмів у стінках підземних трубопроводів та розробити установку для експериментального дослідження метрологічних характеристик розробленої та подібних систем;

- провести лабораторні, польові і промислові випробування розробленої системи безконтактного визначення струмів в стінках підземних трубопроводів.

Об'єктом дослідження є процес витікання (зникання) в землю струму із стінок одного чи двох паралельних підземних трубопроводів тривалої експлуатації, які можуть бути електрично з'єднані між собою.

Предметом дослідження є способи безконтактного визначення струмів у стінках підземних трубопроводів і оцінка стану ізоляційного покриття на основі зміни цих струмів вздовж траси трубопроводів.

Методи дослідження. У дисертаційній роботі для розв'язання поставлених задач використовувалися: методи теорії електромагнітного поля для розроблення способу безконтактного визначення струму в одному підземному трубопроводі та способу визначення точок профілів горизонтальної складової напруженості магнітного поля (профілювання) над одним або двома підземними трубопроводами; методи теорії штучних нейронних мереж для розроблення нейронних мереж для визначення струму в стінках одного або двох підземних трубопроводів; теоретичні засади оброблення результатів спостережень при надлишковості отриманої інформації для розроблення способів безконтактного визначення струмів в стінках одного або двох підземних трубопроводів; методи теорії інформаційно-вимірювальної техніки для розроблення системи безконтактного визначення струмів в стінках підземних трубопроводів; методи теорії похибок вимірювань і математичного моделювання для виконання метрологічного аналізу розробленої системи.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вперше запропоновано використання нейронних мереж для безконтактного визначення струмів у стінках підземних трубопроводів за

значеннями точок профілю горизонтальної складової напруженості магнітного поля і розроблено структуру таких нейронних мереж, що дало можливість підвищити точність і оперативність отримання результатів безконтактного визначення вказаних струмів.

2. Вперше запропоновано і теоретично обґрунтовано спосіб безконтактного визначення струмів в стінках трубопроводів з отриманням на основі значень точок профілю горизонтальної складової напруженості магнітного поля умовних рівнянь і розв'язком отриманих на їх основі нормальних рівнянь, що дозволяє підвищити точність і оперативність отримання результатів.

3. Запропоновано спосіб безконтактного визначення струму в стінці одного трубопроводу, який передбачає використання п'яти магнітних антен в двох блоках без їх орієнтації по відношенню до осі трубопроводу, що дало можливість зменшити кількість магнітних антен.

4. Запропоновано спосіб автоматичної фіксації значень горизонтальної складової напруженості магнітного поля в процесі отримання профілю цієї складової з заданим кроком між точками при проходженні над підземними трубопроводами в перпендикулярному до їх осей напрямку, що дозволяє зменшити тривалість процесу отримання профілів напруженості магнітного поля.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Розроблена і виготовлена система безконтактного визначення струмів в стінках підземних трубопроводів, яка дає можливість реалізувати кожний із запропонованих способів такого визначення струмів, забезпечує прив'язку отриманих результатів до відповідних геофізичних координат за допомогою системи GPS, а також в результаті опрацювання значень струмів вздовж контрольованих трубопроводів отримати інформацію про стан їх ізоляційного покриття.

2. Проведені промислові випробування розробленої системи безконтактного визначення струмів в стінках підземних трубопроводів в НГВУ

„Надвірна нафтогаз”, в УМГ „Прикарпаттрансгаз” (КС „Богородчани”), а також польові і лабораторні їх випробування на спеціальному полігоні і розробленій установці. Результати цих випробувань підтвердили передбачувані технічні характеристики розробленої системи, а також дали можливість розробити рекомендації щодо використання різних методик визначення струмів в стінках підземних трубопроводів.

3. Розроблена установка для експериментальних досліджень різних систем і пристроїв безконтактного визначення струмів в стінках підземних трубопроводів, яка дозволяє експериментально оцінювати метрологічні характеристики таких систем.

4. Розроблена система безконтактного визначення струмів в стінках підземних трубопроводів і установка для експериментального дослідження метрологічних характеристик таких і подібних установок і пристроїв впроваджені в навчальний процес із студентами напряму „Приладобудування” і спец. „Прилади та системи неруйнівного контролю” ІФНТУНГ.

Особистий внесок здобувача. Основні теоретичні, розрахункові та експериментальні результати з формулюванням відповідних висновків отримані автором самостійно. У роботах, які опубліковані у співавторстві, здобувачеві належить: [51] – обґрунтування кроку дискретизації горизонтальної складової напруженості магнітного поля для оцінки пошкодженої ізоляції підземних трубопроводів; [52] – запропоновано спосіб визначення дискретизованого із заданим кроком профілю горизонтальної складової напруженості магнітного при проходженні над двома трубопроводами в перпендикулярному напрямку; [63] – запропоновано спосіб одержання умовних рівнянь і переходу від них до нормальних при надлишковій кількості отриманих даних про напруженість магнітного поля над трубопроводами при проходженні із блоком магнітних антен в перпендикулярному напрямку над ними; [53] – розроблення нейронної мережі для безконтактного визначення струмів в стінках підземних трубопроводів; [49] – обґрунтування використання 5-ти магнітних антен у розробленій системі

безконтактного визначення струму в одному підземному трубопроводі; [62] – одержання залежності для визначення величини струму в стінці одного трубопроводу без орієнтації магнітних антен в перпендикулярній до траси трубопроводу площині і без переходу над ним в процесі проведення контролю.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та окремі результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на таких конференціях: V, VI, VII і VIII науково-практичних конференціях „Приладобудування 2006 (2007, 2008, 2009): Стан і перспективи” (м. Київ) – 2006 р., 2007 р., 2008 р., 2009 р.; XIV Міжнародній н/т конференції „Леотест–2009” (м. Славськ, Львівська обл.) – 2009р.; VI Національній технічній конференції і виставці „НКТД–2009” (м. Київ) – 2009р.; XXI відкритій н/т конференції молодих науковців і спеціалістів фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України (м. Львів) – 2009р.; V Міжнародній н/т конференції і виставці „Сучасні прилади, матеріали і технології для НК і ТД машинобудівного і нафтопромислового обладнання” (м.Івано-Франківськ) – 2008р.; V н/т конференції студентів і аспірантів „Ефективність інженерних рішень в приладобудуванні” (м. Київ) – 2009р.

Публікації. За результатами виконаних досліджень опубліковано 15 наукових робіт, з яких 5 – статті у фахових наукових виданнях, що входять до переліку ВАК України, 1 – патент України на винахід, 9 – тези доповідей на н/т конференціях.

Обсяг та структура дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, п’яти розділів основної частини, висновків, переліку використаної літератури та 20 додатків. Загальний обсяг дисертації складає 247 сторінок, з яких основний зміст викладено на 160 сторінках друкованого тексту та 49 рисунках. Список використаних джерел складається із 89 найменувань. Додатки містять програми для визначення умовних і нормальних рівнянь, для розрахунку похибок, електричні схеми відповідних блоків розробленої системи, методики, протоколи та акти випробувань розробленої системи.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ВИЗНАЧЕННЯ СТРУМІВ У СТІНКАХ ПІДЗЕМНИХ ТРУБОПРОВОДІВ З МЕТОЮ ОЦІНКИ СТАНУ ЇХ ІЗОЛЯЦІЙНОГО ПОКРИТТЯ

Підземні металеві трубопроводи є найбільш металомісткими конструкціями, які морально не старіють тривалий час. Ритмічна робота більшості галузей промисловості безпосередньо пов'язана з надійністю трубопроводів. Однією із основних причин відмов трубопровідних систем є їх підземна корозія. Корозійна відмова веде не тільки до втрати металу труби на пошкодженій ділянці, до витрат на ремонтно-відновлювальні роботи, до втрати продукту, що транспортується, але і до значно більших витрат, пов'язаних з перебоями в постачанні підприємств газом, нафтою, водою тощо. Крім того, корозійні відмови породжують екологічні проблеми.

Забезпечення високої надійності трубопроводів є головним завданням як в процесі їх будівництва і монтажу, так і в процесі експлуатації.

Проблема діагностування ізоляційного покриття підземних трубопроводів на даний час займає важливе місце в процесі експлуатації трубопровідного транспорту. Задачу діагностування ускладнює те, що такі трубопроводи постійно знаходяться в експлуатації і немає безпосереднього контакту із ізоляційним покриттям (об'єктом контролю) у зв'язку з перебуванням більшої частини трубопроводів під час роботи в підземних умовах.

Діагностування ізоляційного покриття в основному здійснюють з використанням контактних [1-3] і безконтактних методів [4-5] визначення струмів в стінках підземних трубопроводів. Джерелами таких струмів є станції катодного захисту (СКЗ) або генератори чи лабораторії електрохімзахисту.

Контактні методи контролю є досить поширеними і базуються в основному на вимірюванні потенціалу між трубою і ґрунтом або між точками на землі, розміщеними над трубопроводом [1].

Безконтактні методи контролю ізоляційного покриття ґрунтуються на визначенні струму, який протікає по стінках трубопроводу, і по характеру його зникання (переходу із стінки в навколишній ґрунт) вздовж трубопроводу судять про стан покриття [4].

1.1. Аналіз об'єкта контролю

Об'єктом контролю є ізоляційне покриття одного, двох або більшої кількості підземних, розміщених паралельно і гальванічно з'єднаних трубопроводів. Для захисту від проходження на поверхні трубопроводу корозійних процесів використовується захисне покриття. Крім цього на стінки трубопроводів подають від'ємний потенціал, який запобігає проходження корозії.

Магістральні нафтопроводи і нафтопродуктопроводи підрозділяються на чотири класи залежно від умовного діаметру труб (у мм): I - 1000—1200; II - 500—1000; III - 300—500; IV - менше 300 [6], а в залежності від робочого тиску в трубопроводі підрозділяються на два класи: I - 2,5-10 МПа; II - 1,2-2,5 МПа.

Складність і своєрідність протікання процесу корозії підземних металевих трубопроводів обумовлені особливими умовами підземного середовища, де взаємодіють атмосфера, біосфера, літосфера і гідросфера. На підземні трубопроводи впливає велика кількість хімічних, фізичних і біологічних чинників, що змінюються. Сукупність дії цих змінних чинників і визначає корозійну дію середовища на підземні металеві споруди. Процес підземної корозії протікає як процес корозії металу у водному корозійному середовищі. Хімічні реакції, що протікають між металом і водним корозійним середовищем, пов'язані із перенесенням заряджених частинок через межу

розділу фаз і значною мірою аналогічні процесам, що протікають при електролізі.

Найвагомішими чинниками корозійного руйнування зовнішньої поверхні сталевих трубопроводів є:

- корозійна активність середовища (ґрунтів, атмосфери, ґрунтових та інших вод) по відношенню до металу трубопроводу;
- дія блукаючих струмів;
- температура продукту, що транспортується по трубопроводі.

Корозійна активність середовища стосовно металу трубопроводу характеризується значенням швидкості корозії металу трубопроводу у середовищі та/або значенням питомого електричного опору ґрунту і оцінюється відповідно до табл. 1.1 [7].

Таблиця 1.1

Корозійна активність середовища стосовно металу трубопроводу

Корозійна активність середовища	Швидкість корозії металу, мм/рік	Питомий електричний опір ґрунту, Ом/м
Низька	До 0,01	Понад 50
Середня	Від 0,01 до 0,30	Від 20 до 50
Висока	Понад 0,30	До 20

Швидкість корозії металу та питомий електричний опір ґрунту визначають шляхом досліджень з використанням вимірювачів опору із чотирьохелектродною схемою [7].

Небезпечною дією блукаючих струмів вважають наявність знакозмінного (знакозмінна зона) або позитивного зміщення різниці потенціалів між підземним трубопроводом та електродом порівняння (анодна зона), що змінюється в часі. Вимірювання потенціалів трубопроводу в зоні дії блукаючих струмів виконують вольтметрами за допомогою насичених мідносульфатних електродів порівняння [7].

До корозійно-небезпечних ділянок, незалежно від показників корозійної активності середовища та наявності блукаючих струмів відносять також:

- заплавили 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 продукту, що транспортується, вище 40 °С.

Корозія може підсилуватись виникненням гальванічних пар у разі чергування ґрунтів різного складу під впливом температурних чинників, техногенної діяльності людини, внаслідок розвитку мікробіологічних організмів.

При дослідженні стану ізоляційного покриття визначають електричні параметри, які поділяються на первинні, які є вихідними даними, і вторинні, що отримують в результаті розрахунків [4]. При діагностуванні трубопроводів, як правило, контролювати потрібно первинні параметри. Їх безпосереднє вимірювання є ускладненим, або практично неможливим. Технологічно реалізують електромагнітні вимірювання, за якими оцінюють вторинні параметри. Використання закономірних взаємозв'язків дозволяє визначити контрольовані параметри об'єкта. До первинних параметрів підземних трубопроводів відносять: зовнішній радіус труби; товщина стінки труби; питомий електричний опір матеріалу, з якого виготовлений трубопровід; магнітна проникність металу; опір ізоляції (питомий електричний опір ізолюючого матеріалу, його діелектрична проникність, товщина ізоляційного покриття); глибина залягання; відстань між трубопроводом та іншими трубопроводами, кабелями, рейковими коліями тощо.

Основні параметри підземних трубопроводів приведені в табл. 1.2-1.3 [4].

Вторинні параметри отримують шляхом розрахунків. До них відносяться питомий поздовжній опір, перехідний опір труба – ґрунт, вхідний опір у точці приєднання катодної установки до трубопроводу.

Таблиця 1.2

Конструктивні та електричні параметри підземних трубопроводів

Параметр	Одиниця виміру	Значення параметру
Трубопровід		
Зовнішній діаметр	мм	57, 76, 89, 108, 133, 159, 219, 245, 273, 299, 325, 377, 426, 529, 620, 720, 820, 920, 1020, 1220, 1420, 1620
Товщина стінки	мм	3.5-30
Питомий електричний опір	мкОм·м	0.18-0.29
Магнітна проникність	-	120-300
Ізоляційні покриття		
Товщина	мм	
бітумних		3, 6, 9
полімерних		0.6-3
епоксидних		0.3-0.5
Початковий перехідний опір покриття	кОм·м ²	
бітумних		3
полімерних		5-10
епоксидних		50-100
Оточуюче середовище, ґрунт		
Питомий електричний опір	Ом·м	2-5000
Опір анодного заземлення	Ом	0.4-3.5

Питомий поздовжній опір сталюого трубопроводу ρ_T (Ом/м), що має стандартні розміри, в практиці будівництва магістральних трубопроводів обчислюють за формулою:

$$\rho_T = \frac{\rho_{cm}}{\pi(D-\delta)\delta}, \quad (1.1)$$

де ρ_{cm} - питомий опір трубної сталі;

δ - товщина стінки трубопроводу.

Таблиця 1.3

Значення опору ізоляції трубопроводу R_i залежно від стану покриття

Якість ізоляції	Пошкодження	Орієнтовні межі електричного опору, Ом·м ²
Відмінна	Відсутні	10000
Добра	Малі одиничні	10000-2500
Задовільна	Малі у невеликій кількості	2500-500
Погана	Помітні, значні	500-50
Дуже погана	Покриття зруйноване	50-5

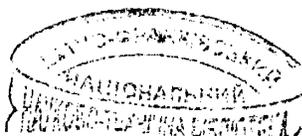
Перехідний опір ізолюваного трубопроводу згідно з [1] можна записати у вигляді:

$$r_{iz} = \frac{R_{d.cym}}{1 + R_{d.cym} / R'_{iz}}, \quad (1.2)$$

де $R_{d.cym}$ - опір електроліту в дефектах ізоляції 1 м² трубопроводу;

R'_{iz} - опір матеріалу ізоляції.

Із виразу (1.2) видно, що при $R_{d.cym} \ll R'_{iz}$ перехідний опір ізолюваного трубопроводу визначається тільки опором дефектів ізоляції. Опір одиничного дефекту визначається виразом



$$R_{\partial.\partial\partial} = R_p + R_{\partial.e}, \quad (1.3)$$

де R_p - опір розтіканню струму з дефекту,

$R_{\partial.e}$ - опір електроліту(грунту) в каналі дефекту ізоляції.

Опір розтіканню визначається з формули [1]

$$R_p = \frac{\rho_T}{2D}, \quad (1.4)$$

де D - діаметр дефекту.

Формула (1.4) використовується для одиничного дефекту. Якщо на трубопроводі є n дефектів, то обчислення виконуються згідно формули

$$R_{pn} = \frac{\rho}{2nD}. \quad (1.5)$$

Аналогічно визначається опір електроліту в дефектах:

$$R_{\partial.e.n} = \frac{4\rho d}{\pi n D^2}, \quad (1.6)$$

де d - товщина ізоляції.

Для суми опорів (1.5) і (1.6) отримаємо:

$$R_{\partial.сум} = R_{pn} + R_{\partial.e.n} = \frac{\rho}{2nD} \left(1 + \frac{8d}{nD} \right). \quad (1.7)$$

Якщо ввести в формулу число дефектів на 1 м^2 , що відноситься до поверхні F , тобто $N = n/f$, то

$$r_{iz} = \frac{\rho}{2ND} \left(1 + \frac{8d}{nD} \right). \quad (1.8)$$

Згідно з [1] r_{iz} падає при збільшенні діаметру дефектів. При великих діаметрах дефектів впливом товщини ізоляційного покриття можна нехтувати, а при малих діаметрах товщина впливає на перехідний опір ізольованого трубопроводу.

1.2. Основні види вимірювань в процесі захисту підземних металевих трубопроводів від корозії

Основні вимірювання, що виконуються при контролі системи захисту підземних металевих трубопроводів від корозії, можна розділити на три групи вимірювань, що проводяться при проектуванні, будівництві і експлуатації трубопроводів [1].

Вимірювання при проектуванні захисту трубопроводів за об'ємом і характером різко відрізняються залежно від того, чи проектується захист для трубопроводу, що прокладається, чи для трубопроводу, укладеного вже в ґрунт. У першому випадку вимірювання допомагають визначити корозійну небезпеку для проектованого трубопроводу і вибрати засоби їх захисту виходячи з умов прокладки трубопроводу і даних корозійної активності середовища.

Корозійну активність ґрунтів оцінюють за питомим електричним опором ґрунту, втратою маси зразків, густиною поляризованого струму.

При проектуванні захисту укладених в землю трубопроводів насамперед стараються визначити їх корозійний стан. При цьому вимірюють: різниці потенціалів між трубопроводом і землею, а за наявності блукаючих струмів різниці потенціалів між трубопроводом і рейками електрифікованого транспорту; величини і напрями блукаючих струмів, що протікають по трубопроводу; лінійну густину струму розтікання з трубопроводу.

При будівництві трубопроводів всі вимірювання можна розділити на дві основні групи: вимірювання, що проводять при виконанні ізоляційно-укладочних робіт, і вимірювання, що проводять при монтажі і наладці електрохімічного захисту.

Вимірювання, що проводяться при ізоляційно-укладочних роботах, у свою чергу, можна розділити на вимірювання, що проводяться при контролі за якістю ізоляційних робіт, і вимірювання, що проводяться в процесі укладання і засипки трубопроводу в траншеї.

При контролі якості виконання ізоляційних робіт вимірюють ступінь очищення поверхні труб; перевіряють матеріали, що йдуть на виготовлення покриттів, на відповідність технічним вимогам; контролюють параметри виконання технологічного процесу на їх відповідність встановленій нормативно-технічній документації; вимірюють товщину, суцільність покриттів, їх адгезію до металу.

В процесі укладання трубопроводу в траншею і його засипки ґрунтом перевіряють наявність дефектів в ізоляції. Вимірюють перехідний опір магістральних трубопроводів по методу катодної поляризації [1].

При монтажі і наладці електрохімічного захисту вимірювання проводяться в основному для визначення параметрів установок електрохімічного захисту і контролю ефективності їх дії. При цьому вимірюють: різницю потенціалів між трубопроводом і землею, стаціонарний потенціал трубопроводів в умовах наявності блукаючих струмів, поляризаційний потенціал трубопроводу в зоні дії засобів електрозахисту, загальний захисний струм електрохімічного захисту, напругу на виході установок електрохімічного захисту, питомий опір ґрунту, опір анодного заземлення при катодному захисті, опір гальванічних анодів.

При експлуатації системи захисту трубопроводів від корозії вимірювання можна розділити на дві групи: вимірювання, пов'язані з визначенням стану захисних покриттів, і вимірювання, що проводяться для контролю ефективності роботи установок електрохімічного захисту.

Перша група включає вимірювання перехідного опору труба - ґрунт і вимірювання, які виконуються при шурфуванні.

Друга група включає вимірювання поляризаційних потенціалів на трубопроводі в зоні дії засобів електрохімічного захисту, вимірювання різниці потенціалів труба - ґрунт, а також вимірювання, що проводяться при технічному огляді пристроїв електрохімічного захисту.

1.3. Контактні методи та засоби для дослідження стану ізоляційного покриття підземних трубопроводів і визначення струмів в їх стінках

Вимірювання сили струму в стінках підземних трубопроводах дозволяє судити з достатньо високою точністю про стан ізоляції підземних трубопроводів та ступеня захищеності трубопроводів від корозії. Знаючи силу і напрям струму в підземних трубопроводах, можна визначити місце розташування і протяжність анодних зон. Якщо трубопровід не захищений і не має металевого контакту з іншими підземними металевими спорудами, наявність постійного струму в трубопроводі може бути пояснена або дією макрогальванопари, або впливом джерел блукаючих постійних струмів.

Існує декілька методів вимірювання сили струму в трубопроводі. Найбільш поширені два методи: метод падіння напруги та метод компенсації [1-3].

Метод падіння напруги полягає у вимірюванні падіння напруги між двома точками трубопроводу (рис. 1.1). Сила струму в трубопроводі визначається за формулою

$$I = \frac{\Delta U_T}{R_T l}, \quad (1.9)$$

де ΔU_T - падіння напруги між точками трубопроводу,

R_T - подовжній опір трубопроводу,

l - відстань між точками вимірювання.

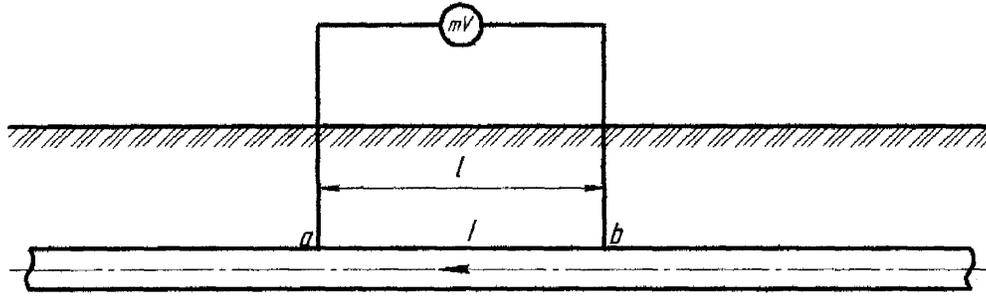


Рис. 1.1. Схема визначення струму в підземному трубопроводі методом падіння напруги

Контакт з трубопроводом забезпечується або за допомогою катодних виводів, або за допомогою магнітних контактів, що встановлюються в шурфі. Контакт з трубопроводом може бути здійснений за допомогою кранів, засувок та іншого металевих устаткування трубопроводу. В тому випадку, якщо вимірюється сила струму в трубопроводі, що пролягає паралельно іншим, то необхідно, щоб між двома точками a і b (рис. 1.1) не знаходилися технологічні або електричні перемички, що з'єднують паралельні споруди. При виконанні вимірювань усі електричні перемички повинні бути відключені. Щоб уникнути великих похибок не слід використовувати при вимірюваннях для контакту з трубою катодний вивід, до якого підключена катодна станція або групова протекторна установка. Металевий контакт з трубопроводом повинен бути надійним, оскільки за наявності вологи в місці контакту похибка може бути великою унаслідок утворення там додаткового стрибка потенціалів.

Прилади для вимірювання падіння напруги слід вибирати з умови

$$R_{\text{вн. пр}} \geq (R_{\text{пр}} + R_{\text{т}} l) \delta, \quad (1.10)$$

де $R_{\text{вн. пр}}$ - внутрішній опір вимірювального приладу,

$R_{\text{пр}}$ - опір з'єднувальних проводів,

l - довжина ділянки трубопроводів,

δ - похибка вимірювання.

Другий доданок нерівності (1.10), як правило, набагато менший першого, тому характеристики приладу для проведення контролю повинні задовольняти умову $R_{вн.пр} \geq R_{пр} \delta$. При вимірюванні падіння напруги на ділянці довжиною 1 км із застосуванням дроту типу ПМВГ площею січення $0,75 \text{ мм}^2$ внутрішній опір мілівольтметра повинен бути не менше 1500 Ом. Похибка, що в цьому випадку вноситься, буде меншою 2% [1].

При застосуванні компенсаційних приладів опір проводів не вноситиме додаткової похибки.

Як вимірювальний прилад рекомендується використовувати компенсаційні прилади УКИП-56 або УКИП-73. Також можливе застосування міліампер-вольтметрів і мікрвольтметрів типу М-231, М-82 та інших, а в зоні дії блукаючих струмів — самописців Н-39.

Метод компенсації базується на компенсації падіння напруги вимірюваної сили струму на ділянці $a-b$ струмом від батареї B (рис. 1.2).

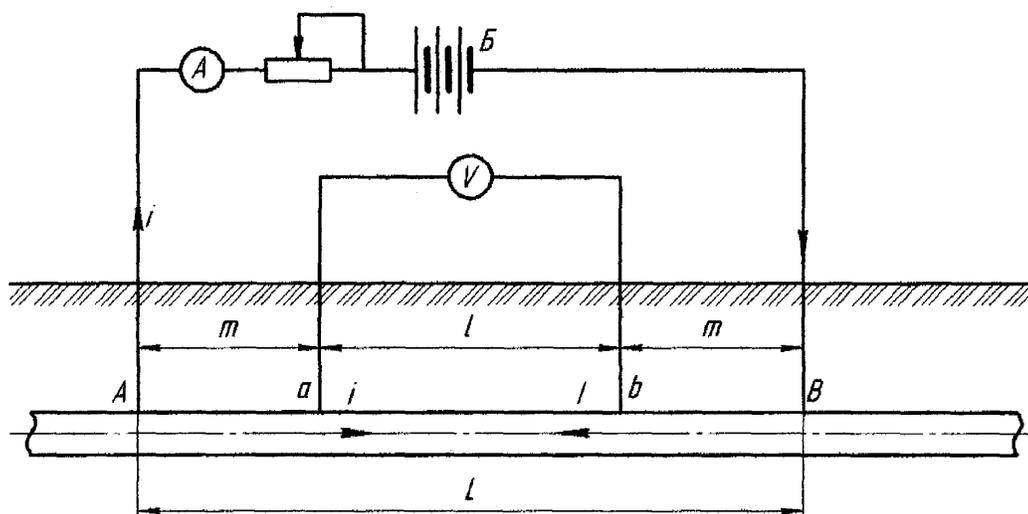


Рис. 1.2. Схема визначення струму в підземному трубопроводі методом компенсації

При рівності сили струмів і при їх протилежному напрямі падіння напруги на ділянці $a-b$ дорівнює нулю. У цей момент сила струму, що протікає через амперметр, дорівнює вимірюваній силі струму.

Застосовуючи цей метод, важливо вибрати відстань між струмовими контактами A і B . Так як при підключенні струмових контактів напрям компенсуючого струму, що протікає між ними, не паралельний осі трубопроводу, відстань L між струмовими контактами

$$L \geq 6D + 1, \quad (1.11)$$

де D - діаметр трубопроводу.

При цьому вимірювальні контакти повинні бути розміщені від струмових на віддалі [1]

$$m \geq 3D. \quad (1.12)$$

Застосування цього методу в зоні дії блукаючих струмів викликає значні труднощі, тому, як правило, в цих умовах він не використовується.

Оцінку стану ізоляційного покриття підземних трубопроводів в паралельних трубопроводах здійснюють так. Нерідко паралельні трубопроводи захищають однією або декількома катодними станціями. Причому в точці дренажу є технологічна або глуха перемичка. В цьому випадку розподіл струму між трубопроводами невідомий, що не дозволяє оцінити стан ізоляційного покриття по такому показнику, як середня густина струму витoku. Сила струму в паралельних трубопроводах вимірюється також методом падіння напруги. Найближчу до точки дренажу контрольну-вимірювальну колонку або контакт з трубою здійснюють на відстані, рівній або більшій трьом діаметрам трубопроводу.

Розглянуті методи дозволяють знаходити ділянки трубопроводу, на яких відбувається зникання струму. Для точного визначення місця знаходження дефектів ізоляційного покриття використовують шукачі пошкодження.

Принцип пошуку дефектів в ізоляції полягає в тому, що при підключенні до трубопроводу генератора змінного струму звукової частоти на поверхні ґрунту біля дефекту виникає градієнт потенціалів за рахунок струмів, що протікають через дефект. Чим більший дефект, тим більший струм зникає із стінки трубопроводу в ґрунт, тим більший градієнт електричного поля. При цьому, якщо градієнт потенціалу вимірюється поздовжньою установкою вимірювальних електродів, які знаходяться над віссю трубопроводу, то при русі установки вздовж осі комунікації максимальний градієнт поля буде виміряний при проходженні електродів (спочатку першого, потім другого) над дефектом. При поперечній установці електроди розташовуються перпендикулярно до осі трубопроводу і один з них знаходиться над віссю трубопроводу, максимальний градієнт буде отриманий при перетині установкою місця знаходження дефекту (рис. 1.3).

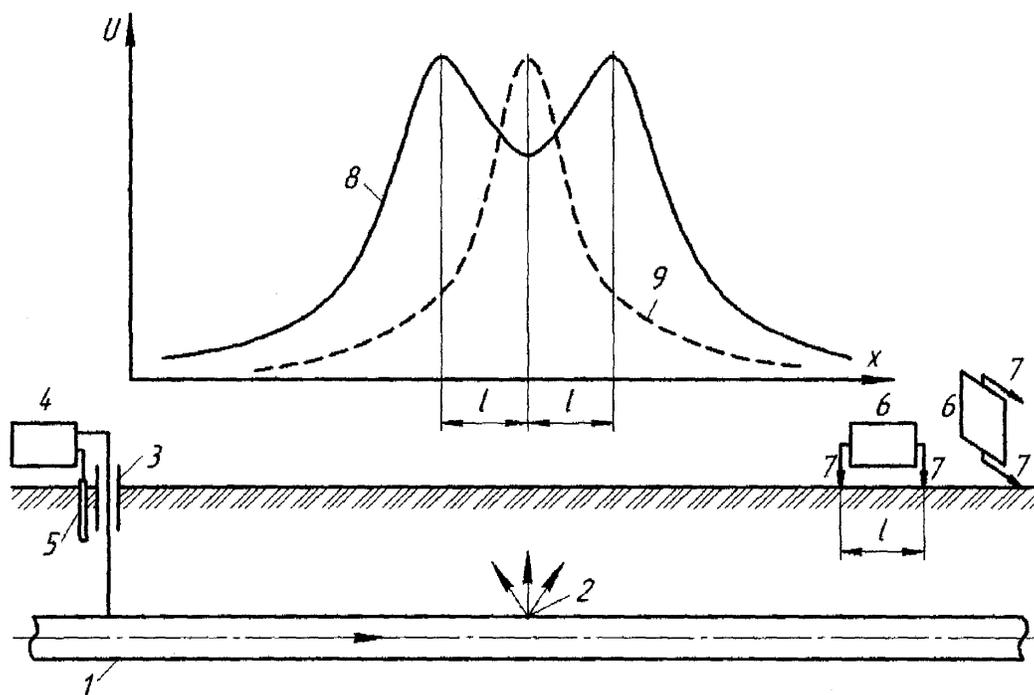


Рис. 1.3. Пошук пошкодження ізоляції трубопроводу шукачем пошкодження:
 1-трубопровід; 2- пошкодження ізоляції; 3-контрольно-вимірювальний пункт; 4-генератор; 5- заземлювач; 6-приймач; 7-електроди; 8, 9 – розподіл градієнта електричного поля вздовж нафтогазопроводу при повздовжньому і поперечному розміщенні електродів відповідно

Для реалізації даного методу пошуку дефекту можуть застосовуються ряд шукачів пошкоджень, що серійно випускаються, наприклад АНПІ-А. До складу цих приладів входить генератор, приймач-підсилювач, головні телефони, електроди-шукачі.

Поганий стан ізоляції нерідко обмежує сферу застосування приладів, що базуються на контактному методі визначення потенціалів на поверхні землі, а саме - віддалю 200 – 300 м від точки підключення генератора. На цій ділянці відбувається постійне зменшення інтенсивності звуку в головних телефонах до повного його зникнення. Це, як правило, говорить про протяжний дефект або рівномірно розподілені численні дефекти. Окремі крупні дефекти легко виявляються по найбільшій інтенсивності звуку в головних телефонах.

1.4. Безконтактні методи та засоби для дослідження стану ізоляційного покриття підземних трубопроводів і визначення струмів в їх стінках

Безконтактне вимірювання струмів в трубопроводах ґрунтується на залежності напруженості магнітного поля H , створюваного навколо трубопроводу, від сили струму I у стінці трубопроводу [4]:

$$H = \frac{I}{2\pi r}, \quad (1.13)$$

де r - відстань від осі трубопроводу до точки вимірювання.

В якості приймача сигналу використовують магнітну антену (індукційну рамку чи котушку). Залежність вихідного сигналу U , із якої можна визначати силу струму I в стінці трубопроводу, залежить від положення магнітної антени відносно осі трубопроводу (рис. 1.4) [8]:

$$U = \frac{K}{2\pi} \frac{I}{z} \sin^2 \varphi \cdot \sin(\alpha - \varphi), \quad (1.14)$$

де K - коефіцієнт, що пов'язує напруженість змінного магнітного поля H з напругою на виході магнітної антени і який залежить від конструкції магнітної антени;

z - висота точки вимірювання.

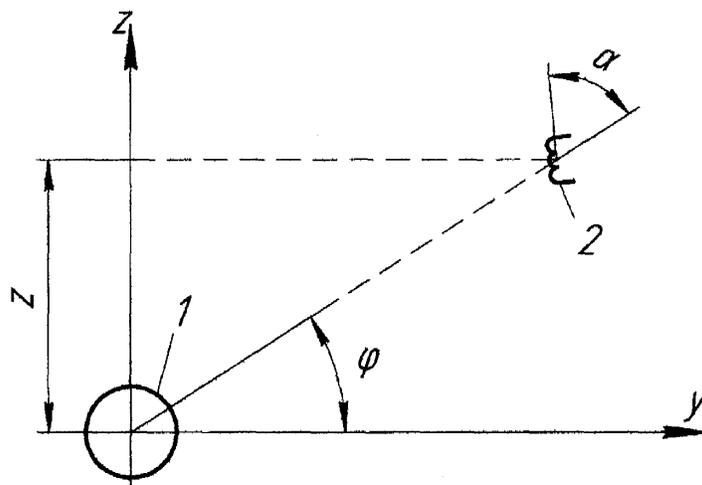


Рис. 1.4. Розміщення вимірювальної котушки 2 відносно трубопроводу 1 із струмом в його стінці

Враховуючи те, що ґрунти є немагнітними і мають невелику електропровідність, то вони практично не вносять спотворення в магнітне поле трубопроводів на частотах до 1-1,5 кГц. Це дозволяє нехтувати впливом межі розділу «земля-повітря» на результуюче магнітне поле на поверхні землі [4].

Вираз для напруженості магнітного поля може спрощуватися залежно від положення вимірювальної антени. При розміщенні антени горизонтально ($\alpha = 0$) напруженість магнітного поля буде визначатися із виразу [4,9]:

$$H_Y = \frac{I}{2\pi} \cdot \frac{z}{y^2 + z^2}, \quad (1.15)$$

де y - горизонтальна координата точки положення антени відносно осі трубопроводу.

Таке розміщення дозволяє визначати положення осі трубопроводу за максимумом сигналу [9-11] (рис. 1.5). Лінії магнітного поля, створеного

змінним струмом, будуть проходити через магнітну антену 2. Найбільший сигнал на виході антени буде спостерігатися при її розміщенні над віссю трубопроводу. Переміщення чи повороти антени в будь-яку сторону призводять до зменшення вихідного сигналу.

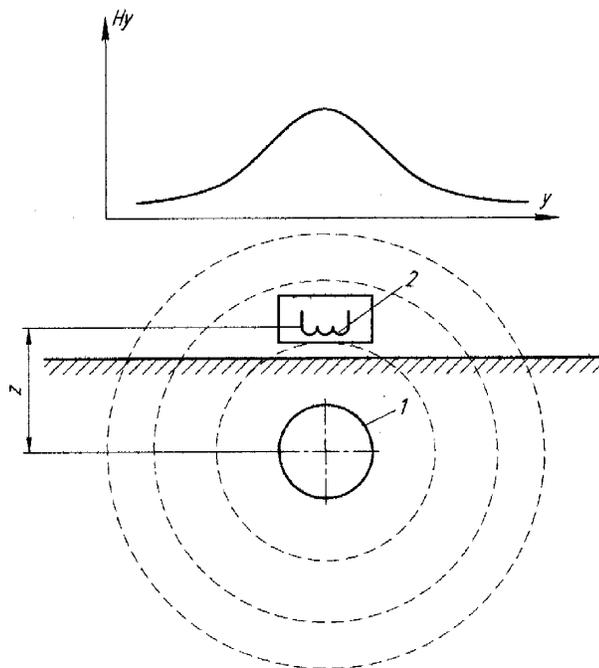


Рис. 1.5. Пошук трубопроводу за методом «максимуму»

Для вертикально орієнтованої магнітної антени ($\alpha = 90^\circ$)

$$H_z = \frac{I}{2\pi} \cdot \frac{y}{y^2 + z^2}. \quad (1.16)$$

Залежність (1.16) описує метод пошуку траси за мінімумом сигналу у вимірвальній котушці [12]. Даний метод зображено на рис. 1.6. В методі «мінімуму» силові лінії магнітного поля при розміщенні вертикально орієнтованої магнітної антени 2 над віссю нафтогазопроводу 1 будуть перетинати антену перпендикулярно її осі. В такому положенні вихідний сигнал з антени буде мінімальним.

При переміщенні магнітної антени вліво і вправо від осі трубопроводу вихідний сигнал буде зростати. Для даного методу характерні два максимуми сигналу з обох сторін трубопроводу.

При виконанні швидкого пошуку місця залягання підземного трубопроводу [8] використовують метод «максимуму», а точне виявлення місця залягання зручніше виконувати за методом «мінімуму», оскільки мінімальний рівень сигналу між двома максимальними рівнями легше визначити, ніж виконувати пошук одного максимального значення.

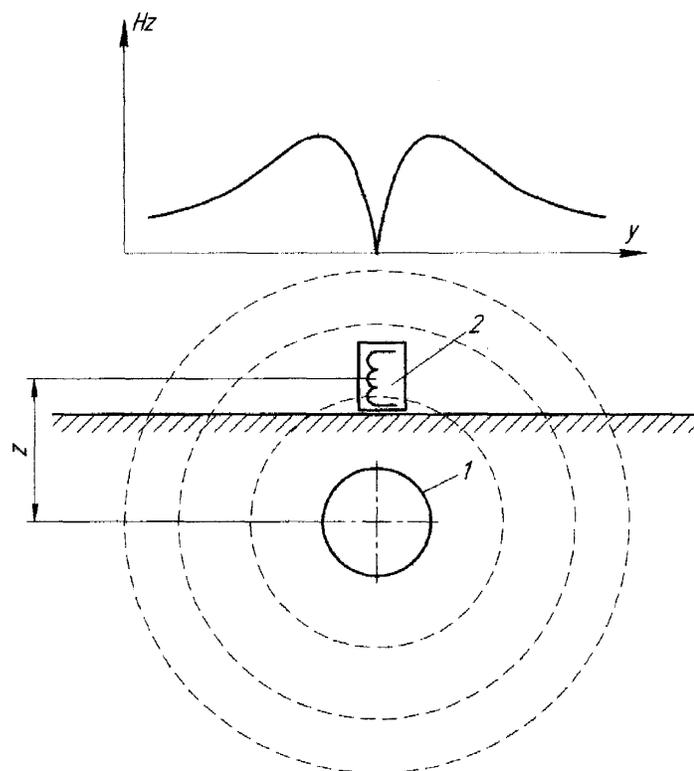


Рис. 1.6. Пошук трубопроводу за методом «мінімуму»

При безконтактному контролі також використовуються і нахилені магнітні антени. Найчастіше це бувають нахилені під кутом 45° антени. Вираз для напруженості магнітного поля в такому випадку буде таким [8]:

$$H_{\frac{\pi}{4}} = \frac{I}{2\pi\sqrt{2}} \cdot \frac{z-y}{y^2+z^2}. \quad (1.17)$$

Згідно із [4] безконтактні методи поділяють на інтегральні та диференціальні. Перші базуються на інтегруванні магнітного поля по контуру, що охоплює струмопровід, і реалізуються як пояс або струмові кліщі [13]. Вони дозволяють вимірювати струм у провідниках складної конструкції, але вимагають кругового доступу до трубопроводу, що практично не реалізується при трасових обстеженнях підземних трубопроводів.

Диференціальні методи базуються на просторових характеристиках поля, створеного струмом. Вони дають змогу вимірювати струми в захованих провідниках при односторонньому доступі до поверхні.

Проводити контроль ізоляційного покриття підземних трубопроводів за допомогою однієї магнітної антени можливо тільки за умови виконання декількох вимірювань із певними умовами, які, зазвичай, важко виконати. Тому системи контролю містять декілька магнітних антен, які розміщені певним чином і реалізують певні алгоритми розрахунку [4,14-17].

За розміщенням точок спостереження способи безконтактного вимірювання струму поділяються на радіальні (рис. 1.7), азимутальні (рис. 1.8) та інваріантні (рис. 1.9) [4]. За конструкцією приймачів магнітного поля способи поділяються на компонентні (векторні) та модульні (інваріантні до вектора магнітного поля).

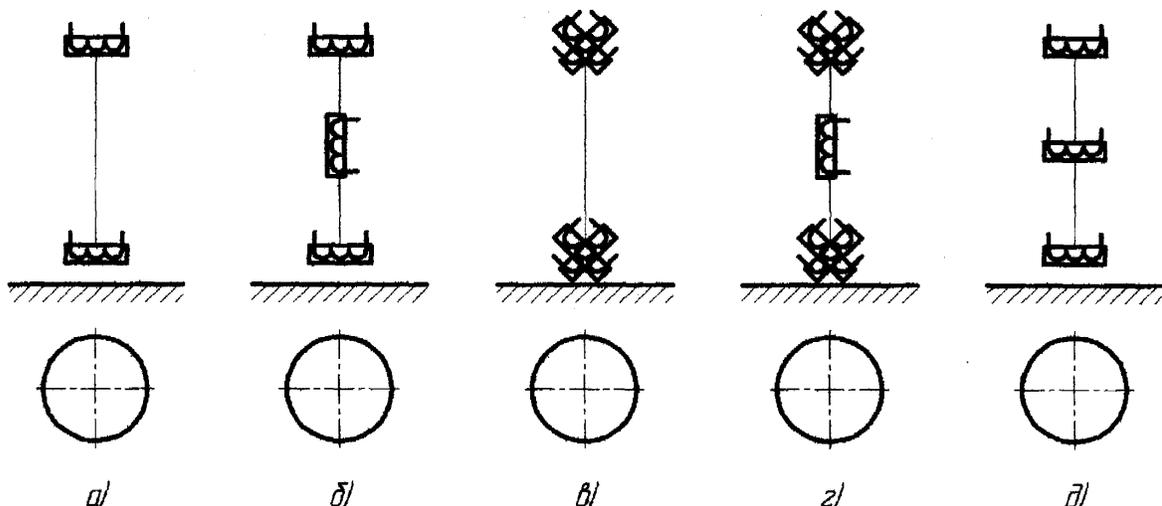


Рис. 1.7. Радіальні способи безконтактного визначення струму

Радіальні способи реалізовані в багатьох приладах і вимагають розміщення магнітних антен над віссю трубопроводу і використовуються як в іноземній, так і у вітчизняній практиці [18,19]. Недоліком даних методів є необхідність визначення точного положення трубопроводу та орієнтації вимірювальної системи.

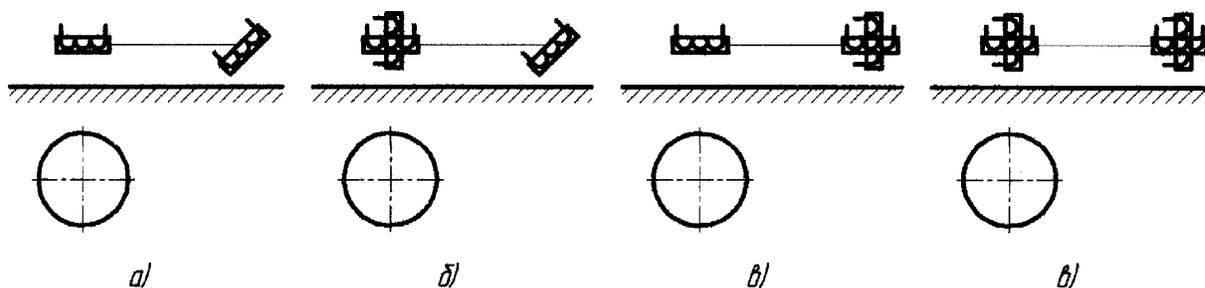


Рис. 1.8. Азимутальні способи безконтактного визначення струму

Способи *a*, *б* (рис. 1.8) реалізують паралаксні методи вимірювань, що здійснюються за допомогою нуль-індикаторів. При цьому використовуються давачі осі і відстані [20]. При цьому один давач встановлено на шарнірі. Це дозволяє розширювати діапазон зміни відстані між антеною і трубопроводом, а також визначати цю відстань [21].

Аналогічними до описаних вище є способи *б* та *в* (рис. 1.8), тільки в цих випадках глибина визначається із відношення горизонтальної та вертикальної складових магнітного поля [22].

Азимутальні способи також вимагають орієнтування певним чином вимірювальних систем.

Використовуючи інваріантні способи, які наведені на рис. 1.9, вимірювальні системи можна розміщувати в довільному місці площини, перпендикулярної до осі трубопроводу [23, 24]. Дані способи мають вищу оперативність та зручність в користуванні.

При безконтактних вимірюваннях струму сигнал із магнітних антен може зніматися як незалежно, так і при диференціальному включенні таких

антен. Така реалізація є в приладі C-SCAN [25 - 26], схема розміщення антен якого приведена на рис. 1.7, з.

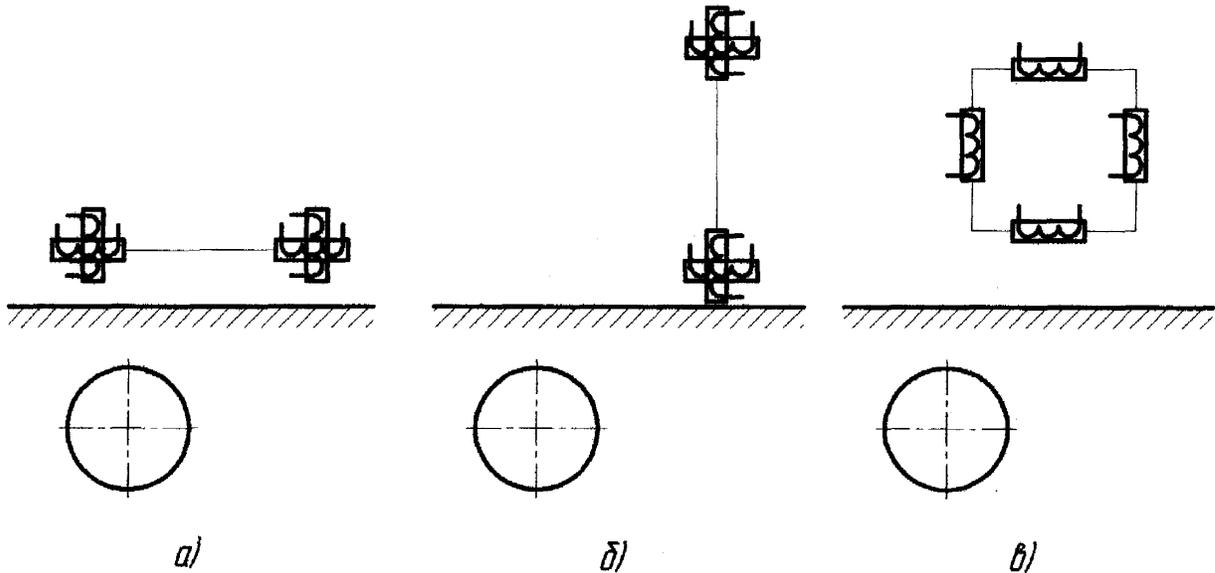


Рис. 1.9. Інваріантні способи безконтактного визначення струму

При диференціальному включенні магнітних антен (рис. 1.7, д) залежність для визначення струму I в трубопроводі буде такою [26]:

$$I = 2\pi(h_B - h_H) \frac{H_B \cdot H_H}{H_B - H_H}, \quad (1.18)$$

де h_B і h_H - відстані від осьової лінії трубопроводу до осьової лінії верхньої та до нижньої антени;

H_B і H_H - значення напруженості магнітного поля, які отримані на виходах верхнього і нижнього перетворювачів.

При використанні перетворювачів з незалежними вихідними сигналами від кожного перетворювача для вказаної системи вимірюваний струм визначатиметься складнішим виразом [19]:

$$I = 2\pi(h_B - h_H) \frac{\sqrt{H_{B1}^2 + H_{B2}^2} \cdot \sqrt{H_{H1}^2 + H_{H2}^2}}{\sqrt{H_{B1}^2 + H_{B2}^2} - \sqrt{H_{H1}^2 + H_{H2}^2}}, \quad (1.19)$$

де H_{B1} , H_{B2} - напруженості магнітного поля, виміряні на виходах кожного верхнього перетворювача,

H_{H1} , H_{H2} - напруженості магнітного поля, виміряні на виході кожного нижнього перетворювача.

Відмітимо, що електромагнітне поле (ЕМП) двох паралельних ізолюваних трубопроводів можна вивчати на основі розв'язку крайових задач електродинаміки [27]. Складові ЕМП описують розкладанням у ряди по елементарних хвильових функціях (просторових гармоніках). Характеристики поширення поля для різних параметрів трубопроводів, середовища і частоти збудження визначають за розв'язками безконечної системи лінійних алгебраїчних рівнянь відносно коефіцієнтів розкладів ЕМП.

Дослідження впливу паралельних трубопроводів виконувалося в [28].

У результаті проведення вимірювань будь-яким із описаних вище методів одержують числові значення сили струму, який протікає в стінках трубопроводу. Вздовж траси буде спостерігатися зникання струму.

Провівши аналіз нормативних документів [6, 7, 26, 29 - 32], було встановлено, що на даний час в Україні немає нормативних документів, які дозволяють визначати якість ізоляційного покриття по зниканню струму. В Росії діє нормативний документ ВРД 39-1.10-026-2001 «Методика оценки фактического положения и состояния подземных трубопроводов» [26], який регламентує проведення безконтактного контролю стану ізоляційного покриття підземних трубопроводів.

Згідно з цим нормативним документом [26] коефіцієнт зникання струму, що протікає в стінках трубопроводу між точками вимірювань, обчислюють за формулою

$$k_{зан} = 2000 \cdot \frac{\lg\left(\frac{I_1}{I_2}\right)}{L_{1-2}}, \quad (1.20)$$

де I_1 і I_2 - струми, виміряні в двох точках, рознесених вздовж траси;

L_{1-2} - віддаль вздовж траси між цими точками вимірювань цих струмів.

За величиною коефіцієнта зникання струму α для певної частоти сигналу і певного діаметру трубопроводу по таблицях або номограмах, наведених в [26] знаходять інтегральну величину опору ізоляційного покриття R_i , віднесену до одного квадратного метру поверхні трубопроводу. Далі по емпіричній формулі

$$S_d = \frac{k}{R_i^2}, \quad (1.21)$$

де $k = 1 \cdot 10^6 \text{ Ом}^2 \cdot \text{м}^2 \cdot \text{мм}^2$ - емпіричний коефіцієнт пропорційності, обчислюють інтегральну величину площі дефекту на одному квадратному метрі цього ізоляційного покриття. Для оцінки швидкості старіння ізоляційного покриття підземного трубопроводу і визначення його ресурсу використовують номограми залежності мінімальних значень сталих часу старіння ізоляційних покриттів від питомого електричного опору ґрунтів і від конструкції основних типів ізоляційних покриттів. Насамперед обчислюється інтегральна величина опору ізоляційного покриття інтервалу R_0 на момент початку його експлуатації по залежності

$$R_0 = R_i \exp\left(\frac{T}{\tau}\right), \quad (1.22)$$

де R_0 - величина опору ізоляційного покриття на момент початку експлуатації трубопроводу;

R_i - величина опору ізоляційного покриття, визначена на поточний момент часу;

T - час експлуатації трубопроводу з даним покриттям;

τ - стала часу даного покриття.

Знаючи величину R_0 , можна оцінювати величину опору ізоляційного покриття на будь-який заданий рік експлуатації цього покриття R_m , яке було кілька років тому або яке буде через декілька років в майбутньому. Величина R_m визначається із залежності

$$R_m = R_0 \exp\left(-\frac{T}{\tau}\right), \quad (1.23)$$

де T - будь-який рік експлуатації трубопроводу до моменту обстеження покриття або будь-який рік експлуатації в майбутньому.

Залежність (1.23) дозволяє прогнозувати зміну стану ізоляційного покриття і визначати ресурс або старіння покриття.

В загальному випадку при безконтактному контролі ізоляційного покриття підземних трубопроводів до трубопроводу під'єднують спеціальний генератор, який створює струм в металічних стінках. Можливий також й індукційний спосіб створення магнітного поля навколо досліджуваного трубопроводу. Для усунення впливу завад на результати обстежень вибирають частоту генератора, яка є не кратною промисловим частотам 50 та 100 Гц та їх гармонікам. Проведення вимірювань рекомендується виконувати на частотах: 75; 81; 125; 244; 375; 477; 976; 1125 Гц [33].

Приймальний пристрій складається із ряду магнітних антен, розміщених відповідно до методики контролю. Крім визначення сили струму приймальні пристрої більшості систем контролю дозволяють знаходити місце залягання підземного трубопроводу, напрямок його проходження та глибину залягання.

1.5. Аналіз відомих пристроїв для визначення струмів в стінках підземних трубопроводів

Існуючі пристрої для пошуку пошкоджень ізоляційного покриття

підземних трубопроводів поділяються на пристрої, які працюють на принципах електрометричних та магнітометричних методів вимірювань.

Технічні характеристики приладів, які були проаналізовані, приведені в табл. 1.4

Таблиця 1.4

Технічні характеристики приладів для контролю стану ізоляційного покриття підземних трубопроводів безконтактним методом

Пристрій	Радіус дії генератора, м	Макс. глибина дослідж. трубопроводу, м	Робоча частота, Гц
ИПИТ-2	1500	8	1000
Универсал-911	2000	10	1071
АНПИ-А	2000	5	1030
УКИ-1М	3000	5	100, 1000
ИПК-01	5000	6	100-2000
ПОИСК-210Д-2	1500	5	273, 2187
ПОИСК-310Д-2	8000	6	2187,5, 273,5
C-SCAN	10000	9	937
Radidetection PCM	15000	8	8, 128, 640
БИТ-КВП	15000 -	8	78 100 (СКЗ)
ТИ-05Ц	3000	5	2430, 893, 8930
Сталкер-200	2000	6	32, 768
Оникс ТМ-2	8000	6	117; 234; 469; 937
Спрут-5	3000	5	1024
БКІТ-2	3000	5	87, 457

Для пошуку наскрізних пошкоджень ізоляційного покриття контактним електрометричним методом призначені прилади ИМПИ, ИПИ-85, «Пеленг», УКИ, АНПИ, УДИП-1М та ін. [1, 4]. Недоліками такого методу є обмежений радіус дії контролю, залежність сигналу від опору ґрунту та глибини залягання трубопроводу, потреба попереднього визначення місця залягання трубопроводу, чутливість до завад, ненадійність контакту електродів із ґрунтом при опорі поверхні ґрунту більше 100 Ом·м [4].

На основі приведених технічних характеристик відомих приладів для контролю стану ізоляційного покриття підземних трубопроводів можна встановити, що більшість відомих приладів мають недостатню точність пошуку місць пошкоджень ізоляційного покриття підземних трубопроводів. Високу точність пошуку дефектів з використанням магнітометричних методів має прилад ПОИСК-310Д-2. Це досягається за допомогою фазового методу пошуку пошкоджень. Недоліками цього методу є складність синхронізації генератора та приймального пристрою. Також є імовірність пропуску зсуву фази.

Згідно із [34 - 37] прилади АНПИ-А, ИПК-01, ПОИСК-210Д-2, ТИ-05Ц, Сталкер-200 мають низьку чутливість та завадозахищеність. Деякі з них не мають можливості автоматизувати процес оброблення результатів контролю, що збільшує час на проведення контролю.

В нафтогазовому комплексі України часто використовуються безконтактні вимірювальні системи «Спрут 5» (виробництво ВКФ «Кром», Україна) та «Оникс ТМ2» (виробництво ООО «АКА-ГЕО», Росія).

Серед недоліків системи «Спрут 5» слід відзначити наявність тільки однієї частоти при активному режимі пошуку. Пошук пошкоджень ізоляційного покриття підземних трубопроводів відбувається за знаходженням місць значного зникання струму – більше 10-20%. Пошук місць пошкоджень таким способом є неоптимальним.

Система «Оникс ТМ2» згідно з її паспортними даними дозволяє визначати струм в підземному трубопроводі з похибкою до 10%, що є

недостатньо для точного виявлення місць пошкодження ізоляційного покриття підземних трубопроводів.

Прилади безконтактного контролю ізоляційного покриття C-SCAN, Radidetection PCM і БІТ-КВП [38 - 41] є зручніші в користуванні і дозволяють автоматизувати процес контролю, проте для них можливі похибки вимірювань внаслідок неточності позиціонування над трубопроводом та відхилення приладу від площини, перпендикулярної до осі трубопроводу. Ці системи також не дозволяють контролювати близько розміщені паралельні трубопроводи. Прилад БІТ-3, в якому використовують два блоки магнітних антен, що включають по дві антени в кожному, дає можливість вимірювати струм при довільному розміщенні бази антени у площині, перпендикулярній трубопроводу, з відхиленням від якої похибка зростає. Повністю інваріантними приладами є прилади, які використовують два блоки магнітних антен, що містять по три антени в кожному блоці.

Для безконтактного контролю ізоляційного покриття декількох паралельних електрично з'єднаних трубопроводів використовується прилад БКІТ-2 [42], але з ним виникають труднощі щодо точного визначення профілю напруженості магнітного поля, який повинен отримуватися в площині, перпендикулярній до осі трубопроводів. До недоліків БКІТ-2 відноситься значна тривалість проведення контролю, що пов'язано із використанням для визначення профілю напруженості магнітного поля попередньо орієнтованої спеціальної профілювальної стрічки.

1.6. Обґрунтування напрямку дослідження

З урахуванням вищесказаного можна стверджувати, що на даний час відомі і широко застосовуються як контактні методи обстежень ізоляційного покриття підземних трубопроводів, так і безконтактні.

Контактні методи дозволяють визначати місця пошкодження ізоляційного покриття, але для них виникає ряд труднощів при контролі

трубопроводів у ґрунтах із високим питомим опором. Контактними методами також неможливо проводити контроль в місцях із блукаючими струмами та під дорожніми покриттями. Крім цього, їм властивий такий недолік, як значна тривалість проведення контролю.

Безконтактні методи в свою чергу забезпечують вищу точність виявлення пошкоджень ізоляційного покриття, за їх допомогою можна проводити контроль в складних умовах. За допомогою безконтактних методів можна проводити контроль декількох паралельних підземних трубопроводів [43].

Безконтактні методи дозволяють автоматизувати процес вимірювання струму. Вони також дозволяють визначити глибину залягання трубопроводу.

Серед недоліків безконтактних методів слід відмітити необхідність орієнтування переважної більшості вимірювальних систем відносно осі контрольованих трубопроводів, що може вносити похибки в отримані результати. Велика кількість методів безконтактного контролю ізоляційного покриття підземних трубопроводів не забезпечує достатньої точності. Контроль ізоляційного покриття декількох електрично з'єднаних трубопроводів можливий з використанням системи БКІТ-2, але ускладнений через використання профілюючої стрічки. Недоліком системи БКІТ-2 є складність орієнтування профілювальної стрічки в перпендикулярній до осей трубопроводів площині.

В якості методу контролю в дисертаційній роботі вибрано безконтактний, оскільки він є більш інформативним та зручнішим у користуванні. На базі даного методу буде проводитися розроблення методик і засобів для підвищення точності результатів контролю шляхом безконтактного визначення струмів в підземних трубопроводах та підвищення швидкості процесу визначення цих струмів.

Підвищення точності результатів безконтактного визначення струмів в стінках підземних трубопроводів буде здійснюватися за рахунок збільшення кількості вимірів профілів напруженості магнітного поля над контрольованими трубопроводами.

Задачами, які необхідно вирішити в дисертаційній роботі, є такі:

1) розроблення і теоретичне обґрунтування способу безконтактного визначення струму в стінці підземного трубопроводу без конкретної орієнтації магнітних антен по відношенню до трубопроводу;

2) розроблення і теоретичне обґрунтування способу профілювання при проходженні із системою магнітних антен в перпендикулярному напрямку над контрольованими підземними трубопроводами;

3) обґрунтування можливості безконтактного визначення струмів у стінках підземних трубопроводів з використанням нейронних мереж;

4) розроблення способу безконтактного визначення струмів у стінках підземних трубопроводів з отриманням умовних і розв'язком нормальних рівнянь з використанням надлишкової інформації при проходженні в перпендикулярному напрямку над трубопроводами;

5) розроблення удосконаленого пристрою для безконтактного визначення струмів у стінках підземних трубопроводів з реалізацією в ньому запропонованих методик визначення струмів;

6) метрологічний аналіз розроблених методик і удосконаленого пристрою для їх реалізації з метою безконтактного визначення струмів у стінках підземних трубопроводів;

7) розроблення установки для експериментального дослідження метрологічних характеристик пристроїв для безконтактного визначення струмів у стінках підземних трубопроводів.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ УДОСКОНАЛЕННЯ БЕЗКОНТАКТНОГО ВИЗНАЧЕННЯ СТРУМІВ В СТІНКАХ ПІДЗЕМНИХ ТРУБОПРОВОДІВ

Для ефективного проведення досліджень ізоляційного покриття підземних трубопроводів необхідно розробити спосіб, який би дозволяв оперативно і з високою точністю визначати струм, що протікає в стінках контрольованого трубопроводу.

На основі такого способу можна буде сформулювати основні вимоги до системи контролю.

2.1. Компоненти магнітного поля над підземними металевими трубопроводами із струмом в стінках

Як уже зазначалося в розділі 1 напруженість магнітного поля в точці вимірювання пов'язана із струмом, який протікає в стінках трубопроводу та відстанню до точки вимірювання. Згідно з [5] для одного трубопроводу відповідно горизонтальна $H_y(y, z)$ та вертикальна $H_z(y, z)$ складові напруженості будуть такими:

$$H_y(y, z) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{Iz}{z^2 + y_0^2}, \quad (2.1)$$

$$H_z(y, z) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{Iy}{z^2 + y_0^2}, \quad (2.2)$$

де I - сила струму, який протікає в стінках підземного трубопроводу;

y_0 - відстань точки контролю по горизонталі до осі трубопроводу;

z - відстань по вертикалі від осі трубопроводу до точки спостереження.

Враховуючи [44, 45], для практичного застосування залежності (2.1) та (2.2) вводиться початок відліку d – відстань по горизонталі від осі трубопроводу до початку координат. Тоді (2.1) та (2.2) будуть такими:

$$H_y(y, z) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{Iz}{z^2 + (y - d)^2}, \quad (2.3)$$

$$H_z(y, z) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{I(y - d)}{z^2 + (y - d)^2}, \quad (2.4)$$

де y - відстань точки контролю по горизонталі до умовного початку координат.

Це робиться для того, щоб виключити необхідність пошуку місця залягання трубопроводу, оскільки в залежностях (2.1) та (2.2) початок координат знаходиться над віссю трубопроводу.

Аналогічно записують залежності для напруженості магнітного поля у випадку декількох електрично з'єднаних між собою паралельних трубопроводів з відліком y від першого трубопроводу:

$$H_y(y, z) = \frac{1}{2\pi} \cdot \left(\frac{I_1 z_1}{z_1^2 + y^2} + \sum_{i=2}^n \frac{I_i z_i}{z_i^2 + (y - b_i)^2} \right), \quad (2.5)$$

$$H_z(y, z) = \frac{1}{2\pi} \cdot \left(\frac{I_1 y}{z_1^2 + y^2} + \sum_{i=2}^n \frac{I_i (y - b_i)}{z_i^2 + (y - b_i)^2} \right), \quad (2.6)$$

де i - порядковий номер трубопроводу,

I_1, \dots, I_i - струм в стінках відповідного трубопроводу,

z_1, \dots, z_i - глибина залягання відповідного трубопроводу,

b_i - відстань між осями першого та i -ого трубопроводів по горизонталі,

n - кількість трубопроводів.

Із введеною координатою d залежності (2.5) та (2.6) запишуться так:

$$H_y(y, z) = \frac{1}{2\pi} \cdot \left(\frac{I_1 z_1}{z_1^2 + (y - d)^2} + \sum_{i=2}^n \frac{I_i z_i}{z_i^2 + (y - b_i - d)^2} \right), \quad (2.7)$$

$$H_z(y, z) = \frac{1}{2\pi} \cdot \left(\frac{I_1(y-d)}{z_1^2 + (y-d)^2} + \sum_{i=2}^n \frac{I_i(y-b_i-d)}{z_i^2 + (y-b_i-d)^2} \right). \quad (2.8)$$

Таким чином струм в стінці трубопроводу буде створювати навколо трубопроводу магнітне поле, яке буде мати горизонтальну і вертикальну складові напруженості.

З другого боку, струм в стінці трубопроводу залежить від стану його ізоляційного покриття і величина його проникання в землю через ізоляцію буде свідчити про стан цієї ізоляції. Напруженість наведеного магнітного поля також залежить від координат точки вимірювання, від відстані між осями трубопроводів і відстані до умовного початку координат O .

2.2. Спосіб безконтактного визначення струму в стінці підземного трубопроводу шляхом однократного вимірювання напруженості магнітного поля магнітними антенами без попередньої фіксації їх положення щодо осі цього трубопроводу

Значна кількість методів, що ґрунтуються на вимірюванні напруженості магнітного поля вимагає точного знаходження осі підземного трубопроводу. В такому випадку при вимірюванні затрачається певний час, а також виникають похибки, в яких присутній і людський фактор. Виключення необхідності знаходження осі дозволило б підвищити оперативність отримання результатів.

Підвищення точності визначення струму в стінках підземних трубопроводів можна здійснювати шляхом урахування просторового розміщення підземного трубопроводу. Такі проблеми вирішувалися в [46, 47], але визначення струму відбувалося тільки з використанням магнітних антен, розміщених в площині, перпендикулярній до осі підземного трубопроводу.

В роботі [48] запропонована система з двома трьохкомпонентними приймачами магнітного поля, яку можна розміщувати довільно відносно осі

підземного трубопроводу. Недоліками такої системи є наявність шести магнітних антен та присутність похибок при її нахилі.

Враховуючи вказане, запропонована і розроблена система, що складається із п'яти магнітних антен і яка дозволяє визначати струм у стінці підземного трубопроводу без попереднього точного орієнтування системи відносно його осі. Система дає можливість також визначати просторове розміщення підземного трубопроводу.

Схематичне зображення такої системи приведене на рис. 2.1. Система магнітних антен складається із двох блоків магнітних антен 1 і 2. Перший блок антен містить три котушки – 3, 4, 5. Блок антен 2 містить дві котушки – 6, 7. Блоки розміщені на відстані b між собою.

Для отримання інформаційного сигналу до трубопроводу 8 підключають генератор змінного струму 9. Індукція магнітного поля B , створеного струмом I , що протікає в стінці трубопроводу, на відстані r від нього виражається такою залежністю [4, 27]:

$$B_{\phi} = \frac{\mu_0 I}{2\pi \cdot r}, \quad (2.9)$$

де μ_0 - магнітна стала;

I - сила струму, яка протікає в стінці трубопроводу;

r - відстань до осі трубопроводу.

Під дією магнітного поля на виході котушок системи магнітних антен отримують відповідні напруги, а саме: U_{y1} , U_{y2} , U_{z1} , U_{z2} і U_{x1} , де U_{y1} - сигнал на виході котушки 3, U_{z1} - сигнал на виході котушки 4, U_{x1} - сигнал на виході котушки 5, U_{y2} - сигнал на виході котушки 6, U_{z2} - сигнал на виході котушки 7. Величина напруги, яка індукується в котушці, що розміщена перпендикулярно до ліній магнітного поля згідно з [46, 47, 49] буде такою:

$$U = k \cdot B, \quad (2.10)$$

де k – коефіцієнт, який залежить від конструкції котушки, що використовується і визначається калібруванням.

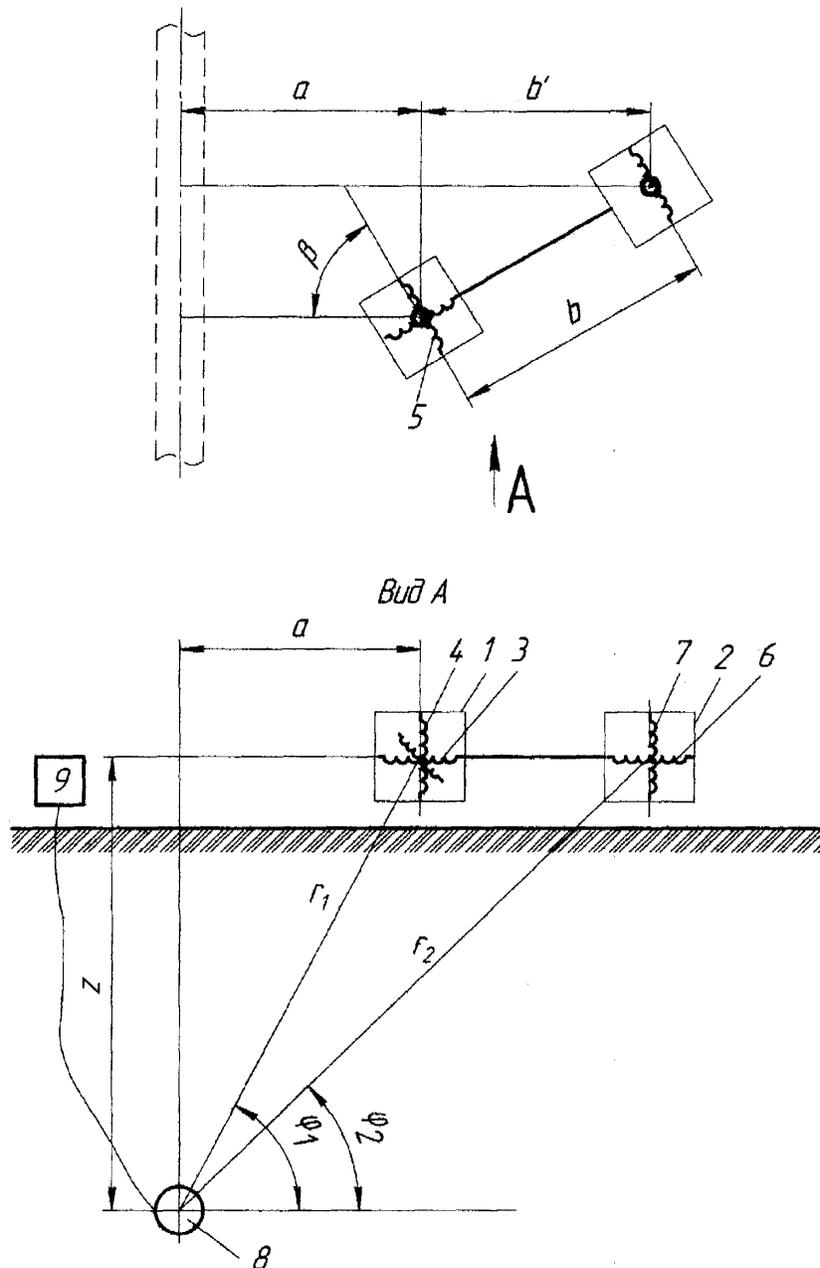


Рис. 2.1. Схематичне зображення системи магнітних антен для контролю стану ізоляційного покриття підземних трубопроводів:

1, 2 - блоки магнітних антен; 3, 4, 5, 6, 7 – котушки; 8 - трубопровід;

9-генератор змінного струму

Значення напруг на виході кожної із котушок з урахуванням відповідних

віддалей і кутів розміщення (рис. 2.1) будуть такими:

$$U_{z1} = \frac{\mu_0 k_{z1} I \cdot \cos \varphi_1}{2\pi \cdot r_1}, \quad (2.11)$$

$$U_{z2} = \frac{\mu_0 k_{z2} I \cdot \cos \varphi_2}{2\pi \cdot r_2}, \quad (2.12)$$

$$U_{y1} = \frac{\mu_0 k_{y1} I \cdot \sin \varphi_1 \cdot \sin \beta}{2\pi \cdot r_1}, \quad (2.13)$$

$$U_{y2} = \frac{\mu_0 k_{y2} I \cdot \sin \varphi_2 \cdot \sin \beta}{2\pi \cdot r_2}, \quad (2.14)$$

$$U_{x1} = \frac{\mu_0 k_{x1} I \cdot \sin \varphi_1 \cdot \cos \beta}{2\pi \cdot r_1}, \quad (2.15)$$

де k_{z1} , k_{z2} , k_{y1} , k_{y2} , k_{x1} - калібрувальні коефіцієнти відповідних магнітних антен.

Виконуючи ділення рівнянь (2.13) на (2.15), (2.13) на (2.11) та (2.14) на (2.12), отримаємо, що:

$$\frac{U_{y1} k_{x1}}{U_{x1} k_{y1}} = \operatorname{tg} \beta, \quad (2.16)$$

$$\frac{U_{y1} k_{z1}}{U_{z1} k_{y1}} = \operatorname{tg} \varphi_1 \cdot \sin \beta, \quad (2.17)$$

$$\frac{U_{y2} k_{z2}}{U_{z2} k_{y2}} = \operatorname{tg} \varphi_2 \cdot \sin \beta. \quad (2.18)$$

Значення $\operatorname{tg}(\varphi_1)$ згідно рис. 2.1 визначається таким чином:

$$\operatorname{tg}(\varphi_1) = z/a. \quad (2.19)$$

Для визначення параметрів a і b' систему магнітних антен розміщують

біля осі трубопроводу (рис. 2.1), за виключенням паралельного положення системи магнітних антен відносно осі трубопроводу. Більша точність вимірювань буде при збільшенні значення параметра b' (рис. 2.1). На практиці цю умову легко виконати, оскільки оператор завжди знає приблизний напрям траси трубопроводу.

Значення кута β між віссю трубопроводу і системою магнітних антен знаходимо із виразу (2.16), тобто:

$$\beta = \operatorname{arctg} \frac{U_{y1} k_{x1}}{U_{x1} k_{y1}}. \quad (2.20)$$

Можливі три варіанти положення блоків магнітних антен відносно трубопроводу: обидва блоки антен розміщені праворуч осі трубопроводу (рис. 2.2, а); вісь трубопроводу знаходиться між двома блоками (рис. 2.2, б); обидва блоки антен розміщені ліворуч осі трубопроводу (рис. 2.2, в). Відповідно до цього значення $\operatorname{tg}(\varphi_2)$ будуть визначатися наступним чином:

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{z}{a + b \sin \beta}, \quad (2.21)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{z}{-a + b \sin \beta}, \quad (2.22)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{z}{a - b \sin \beta}. \quad (2.23)$$

Якщо система контролю знаходиться праворуч осі трубопроводу, то, використовуючи залежності (2.16) – (2.19) та (2.21), значення a та z можна визначити із такої системи рівнянь при наперед розрахованому значенні кута β :

$$\begin{cases} \frac{U_{y1}k_{z1}}{U_{z1}k_{y1}} = \frac{z}{a} \sin \beta, \\ \frac{U_{y2}k_{z2}}{U_{z2}k_{y2}} = \frac{z}{a + b \sin \beta} \sin \beta. \end{cases} \quad (2.24)$$

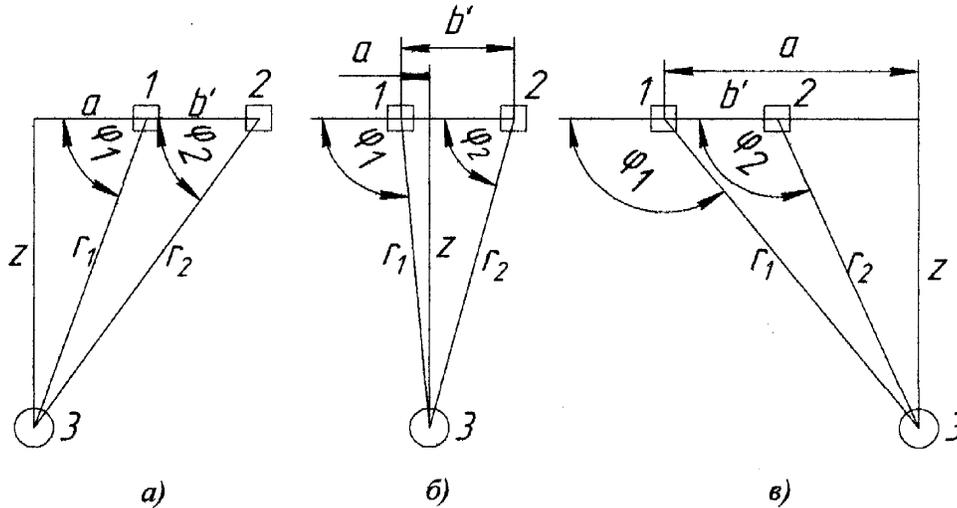


Рис. 2.2. Можливі схеми розміщення системи магнітних антен: а) – праворуч осі трубопроводу; б) – вісь трубопроводу між блоками антен; в) – ліворуч від осі трубопроводу;

1, 2 - блоки магнітних антен; 3 - трубопровід

Якщо вісь трубопроводу знаходиться між блоками магнітних антен, то, використовуючи залежності (2.16) – (2.19) та (2.22), значення a та z визначаються із такої системи рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{U_{y1}k_{z1}}{U_{z1}k_{y1}} = \frac{z}{a} \sin \beta, \\ \frac{U_{y2}k_{z2}}{U_{z2}k_{y2}} = \frac{z}{-a + b \sin \beta} \sin \beta. \end{cases} \quad (2.25)$$

Якщо блоки антен знаходяться праворуч осі трубопроводу, то, використовуючи залежності (2.16) – (2.19) та (2.23), значення a та z

визначаються із такої системи рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{U_{y1}k_{z1}}{U_{z1}k_{y1}} = \frac{z}{a} \sin \beta, \\ \frac{U_{y2}k_{z2}}{U_{z2}k_{y2}} = \frac{z}{a - b \sin \beta} \sin \beta. \end{cases} \quad (2.26)$$

Для визначення реального положення системи магнітних антен відносно осі трубопроводу зручно використовувати порівняння фаз сигналів U_{z1} та U_{z2} .

Якщо ці сигнали мають зсув по фазі 0° , то блоки магнітних антен розміщені по одну сторону відносно осі трубопроводу (або ліворуч, або праворуч). Обчислення глибини z та відстані a до осі трубопроводу при розміщенні системи антен зліва виконується за допомогою залежностей:

$$z = \frac{bU_{y1}U_{y2}k_{z1}k_{z2}}{U_{y1}U_{z2}k_{z1}k_{y2} - U_{y2}U_{z1}k_{z2}k_{y1}}, \quad (2.27)$$

$$a = \frac{bU_{y2}U_{z1}k_{z2}k_{y1} \sin \beta}{U_{y1}U_{z2}k_{z1}k_{y2} - U_{y2}U_{z1}k_{z2}k_{y1}}, \quad (2.28)$$

а при розміщенні системи антен праворуч трубопроводу обчислення глибини та відстані здійснюється так:

$$z = -\frac{bU_{y1}U_{y2}k_{z1}k_{z2}}{U_{y1}U_{z2}k_{z1}k_{y2} - U_{y2}U_{z1}k_{z2}k_{y1}}, \quad (2.29)$$

$$a = -\frac{bU_{y2}U_{z1}k_{z2}k_{y1} \sin \beta}{U_{y1}U_{z2}k_{z1}k_{y2} - U_{y2}U_{z1}k_{z2}k_{y1}}. \quad (2.30)$$

В даному випадку для розрахунку можна використовувати рівняння (2.27) і (2.28) та вважати, що додатній знак результатів визначення z і a

свідчить про розміщення обох блоків магнітних антен зліва від осі трубопроводу, а від'ємний – про їх розміщення справа.

У випадку, якщо сигнали мають зсув по фазі 180° , то блоки антен розміщені по різні сторони осі трубопроводу і обчислення глибини та відстані до осі проводять за залежностями:

$$z = \frac{bU_{y1}U_{y2}k_{z1}k_{z2}}{U_{y1}U_{z2}k_{z1}k_{y2} + U_{y2}U_{z1}k_{z2}k_{y1}}, \quad (2.31)$$

$$a = \frac{bU_{y2}U_{z1}k_{z2}k_{y1} \sin \beta}{U_{y1}U_{z2}k_{z1}k_{y2} + U_{y2}U_{z1}k_{z2}k_{y1}}. \quad (2.32)$$

Використовуючи залежності (2.13), (2.19), (2.20), знаходимо вираз для обчислення величини струму в стінках трубопроводу I :

$$\begin{aligned} I &= \frac{2\pi U_{y1}z}{\mu_0 k_{y1} \sin \left(\arctg \frac{U_{y1}k_{x1}}{U_{x1}k_{y1}} \right) \left(\sin \left(\arctg \left(\frac{z}{a} \right) \right) \right)^2} = \\ &= \frac{2\pi b U_{y1} U_{y2} U_{z1}^2 k_{z2} k_{x1} \left(1 + \frac{k_{z1}^2 U_{x1}^2 \left(1 + \frac{U_{y1}^2 k_{x1}^2}{U_{x1}^2 k_{y1}^2} \right)}{k_{x1}^2 U_{z1}^2} \right)}{\mu_0 k_{z1} U_{x1} \left(U_{y1} U_{z2} k_{z1} k_{y2} \mp U_{y2} U_{z1} k_{z2} k_{y1} \right) \sqrt{1 + \frac{U_{y1}^2 k_{x1}^2}{U_{x1}^2 k_{y1}^2}}}. \quad (2.33) \end{aligned}$$

Знак «-» у виразі (2.33) записується при розміщенні системи по одну сторону від осі підземного трубопроводу, а знак «+» - по різні сторони.

При проведенні контролю декількох паралельних, електрично з'єднаних між собою трубопроводів можливим є визначення тільки кута β між системою магнітних антен і напрямком траси цих трубопроводів згідно (2.20).

2.3. Отримання профілю напруженості магнітного поля над підземними трубопроводами з автоматичним визначенням координат точок вимірювання

З метою отримання більш точних результатів визначення струму в стінці трубопроводу пропонується вимірювання профілю напруженості магнітного поля проводити в площині, яка перпендикулярна до осі трубопроводу. Отримані дані можна опрацювати різноманітними числовими методами (наприклад, градієнтним методом, методом Бокса та ін.) [45, 50]. Але процес обчислення в такому випадку може бути складним та неточним. Наприклад, за допомогою числових методів може бути виявлено локальний максимум або мінімум функції, що і приведе до отримання невірних результатів.

Більша кількість вихідних даних також дозволить підвищити точність, оскільки будуть зменшеними випадкові похибки.

Слід зазначити, що визначення профілю горизонтальної складової напруженості магнітного поля використовував А. Яворський [45]. Це було реалізовано в інформаційно-вимірювальній системі БКІТ-2. На практиці використання такого методу є досить проблематичним, оскільки для реалізації необхідна спеціальна лінійка, яка встановлюється перпендикулярно до траси трубопроводів. При діагностуванні протяжної траси перенесення та встановлення конструкції займає багато часу.

Визначення значень струмів в стінках трубопроводів з використанням профілю напруженості магнітного поля можна використати для діагностування ізоляційного покриття як одного трубопроводу так і для декількох електрично з'єднаних паралельних трубопроводів [51, 52].

2.3.1. Профільювання з використанням спеціальної конфігурації вимірювальних антен

Запропонований нами спосіб, який описаний в [53], дає змогу визначати профіль напруженості магнітного поля, використовуючи систему із декількох

горизонтально розміщених магнітних антен (рис. 2.3.). Відстань між антенами Δy повинна бути постійною і однаковою.

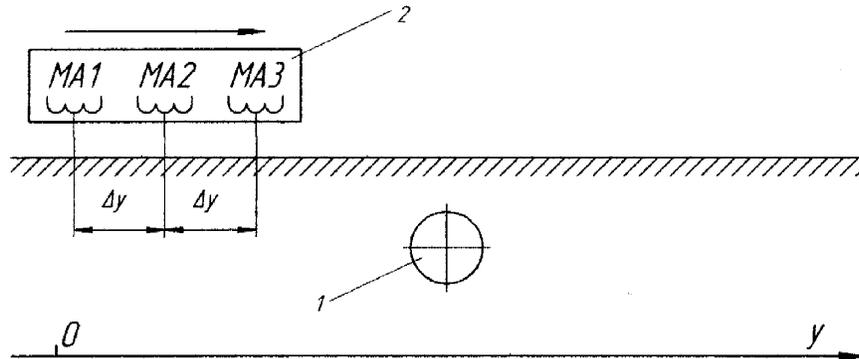


Рис. 2.3. Визначення горизонтальної складової напруженості магнітного поля над трубопроводом з використанням системи горизонтально розміщених магнітних антен:

1 – підземний трубопровід; 2 – блок магнітних антен

Важливою задачею при отриманні профілю напруженості магнітного поля є прив'язка отриманих даних до відстані, тобто необхідна така реалізація, яка б дозволила отримувати крім значень напруженості ще і координати точок вимірювання напруженостей.

Для вимірювання відстані запропонованим методом необхідно, переміщуючи систему на поверхні землі в площині, перпендикулярній до осі трубопроводу, одночасно визначати напруженості поля за допомогою антен MA1 – MA3. В результаті отримують три масиви значень напруженості магнітного поля. Значення елементів кожного масиву з однаковим індексом будуть відповідати горизонтальній складовій напруженості магнітного поля в трьох точках, віддалених на відстань Δy одна від одної в певний момент часу. Проводячи оброблення даних та порівнюючи отримані масиви, можна отримати профіль напруженості магнітного поля над контрольованим підземним трубопроводом.

Користуючись запропонованим способом вимірювання, отримують великий масив вихідних даних, тобто даних профілю горизонтальної складової

напруженості магнітного поля над підземним трубопроводом з кроком Δy .

На рис. 2.4 зображено процес дискретизації профілю напруженості магнітного поля з використанням трьох антен A , B та C і отримання масивів Na , Nb , Nc , які містять значення горизонтальної складової напруженості магнітного поля, що виміряні за допомогою антен A , B , C відповідно і отримані при переміщенні системи антен через вісь трубопроводу.

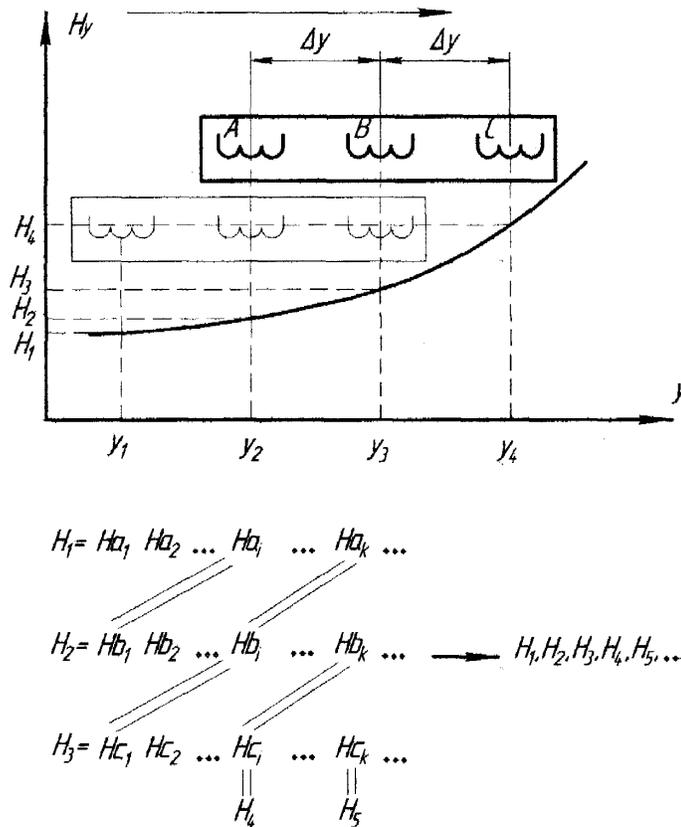


Рис. 2.4. Проведення вимірювань напруженості магнітного поля та обробка отриманих результатів

Алгоритм дискретизації полягає у порівнянні даних масивів Na , Nb , Nc і знаходженні рівних значень напруженостей. Перше вимірювання буде містити три значення напруженості, які і будуть першими трьома точками профілю: $H_1 = Na_1$, $H_2 = Nb_1$, $H_3 = Nc_1$. Далі в масивах Na та Nb послідовно знаходять елементи, які відповідно рівні елементам Nb_1 та Nc_1 : $Nb_1 = Na_i$ та $Nc_1 = Nb_i$. Елемент Nc_i буде містити значення наступної точки

дискретизованого профілю, тобто $H_4 = Hc_i$. Далі операція пошуку повторюється і знаходяться наступні пари значень $Hb_i = Ha_k$ та $Hc_i = Hb_k$ і визначається точка $H_5 = Hc_k$. Процедура пошуку закінчується при досягненні кінця одного із масивів Ha , Hb або Hc .

У результаті пошуку точок за описаним алгоритмом отримують ряд значень $H_1, H_2, H_3, H_4, \dots$, які будуть відповідати профілю горизонтальної складової напруженості магнітного поля, отриманого з кроком Δu .

Мінімальна кількість антен для використання такого способу – 2. Використання в нашому випадку трьох антен дозволяє підвищити точність обчислень, оскільки при цьому на такий спосіб профілювання будуть менше впливати зовнішні завади. Використання ще більшої кількості антен в даному алгоритмі дозволить отримати більше вихідних масивів, підвищити точність, але практична реалізація такої системи автоматичного профілювання суттєво ускладнюється.

Описаний алгоритм досить легко практично реалізують при наявності даних, виміряних з частотою більше 10 вим./с. та при відсутності значних завад. На практиці у виміряному сигналі присутні похибки. Приклад експериментально виміряних масивів напруженості магнітного поля на моделі трубопроводу (металевий провідник), по якому протікає струм 150мА на висоті 0,7м., приведений на рис. 2.5.

2.3.2. Алгоритм згладжування даних при профілюванні з використанням трьох магнітних антен

Оброблення даних при профілюванні отриманих трьома горизонтально розміщеними магнітними антенами (рис. 2.3.) пропонується здійснювати виконуючи згладжування і подальшу апроксимацію цих даних з метою отримання функціональних залежностей для кожної магнітної антени.

Проведені дослідження показали, що для згладжування найдоцільніше

використовувати згладжуючу сплайнову інтерполяцію, оскільки згладжуючий сплайн відрізняється від інтерполяційного тим, що вимога проходження графіка сплайну через задані точки замінюється компромісом між двома вимогами [54]:

- графік сплайну повинен лежати якомога ближче до заданих точок,
- гладкість отриманої кривої повинна бути якомога більшою.

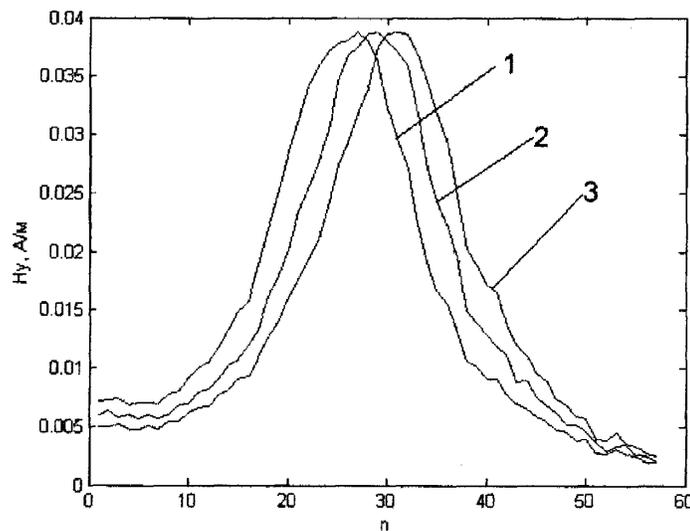


Рис. 2.5. Дані масивів H_a , H_b , H_c при реальному профілюванні системою трьох магнітних антен:

1, 2, 3 – криві горизонтальної складової напруженості магнітного поля, які отримані трьома магнітними антенами

Нехай згладжуючим сплайном буде сплайн $f(x)$, а (x_k, y_k) , $k = 1, 2, \dots, n$ - початкові дані. В якості міри гладкості сплайну $f(x)$ вибирається інтегральна характеристика $F(f)$ його похідної [45]:

$$F(f) = \int_{x_1}^{x_n} \left(\frac{d^m f(x)}{dx^m} \right) dx, \quad (2.34)$$

де m – таке число, що $2m$ - порядок сплайна, який для кубічного сплайна дорівнює 4 (ступінь мінус 1).

Для кубічного сплайну мірою гладкості є:

$$F(f) = \int_{x_1}^{x_n} \left(\frac{d^2 f(x)}{dx^2} \right) dx. \quad (2.35)$$

В якості міри близькості вибирають зважене сумарне відхилення сплайну $E(f)$ від початкових даних:

$$E(f) = \sum_{k=1}^n w_k (y_k - f(x_k))^2, \quad (2.36)$$

де w_k - вагові коефіцієнти.

Вагові коефіцієнти w_k зазвичай вибираються як ваги узагальненої квадратурної формули трапецій. У разі рівновіддалених точок з кроком h :

$$w_1 = w_n = \frac{h}{2}, \quad w_k = h, \quad k = 2, 3, \dots, n-1. \quad (2.37)$$

Далі можна задатися деякою похибкою ρ , $\rho \geq 0$, і шукати такий згладжуючий сплайн, який мінімізує вираз:

$$\rho E(f) + F(f). \quad (2.38)$$

Інший варіант побудови згладжуючого сплайна полягає в заданні параметра p і пошуку сплайна $f(x)$, який мінімізує такий вираз:

$$pE(f) + (1-p)F(f). \quad (2.39)$$

Тут параметр p змінюється від 0 до 1, причому $p=1$ відповідає звичайному кубічному сплайну, а $p=0$ – апроксимації даних лінійною функцією.

Залежно від кількості даних інтерполяцію доцільно проводити із параметром p в межах від 0,0001 до 0,1.

Використання згладжуючої інтерполяції сплайнами дозволяє також знаходити проміжні значення між двома вимірними точками. Це особливо актуально для підвищення точності отримання дискретизованого профілю напруженості магнітного поля при невеликій кількості отриманих даних.

В якості згладжуючого сплайну був вибраний кубічний сплайн.

При виконанні інтерполяції на кінцях отриманого графіка вихідні та інтерпольовані дані часто розходяться. Для виключення цього 10 – 20% початкових та кінцевих інтерпольованих даних рекомендується не враховувати.

2.3.3. Алгоритм проведення вимірювання та дискретизації даних при профілюванні з використанням трьох магнітних антен

Алгоритм проведення вимірювання та дискретизації даних при профілюванні приведений на рис. 2.6. Він складається з трьох основних частин. Перша відповідає за вимірювання та запис значень горизонтальної складової напруженості магнітного поля, друга – за проведення згладжуючої сплайнової інтерполяції, а третя – за обробку отриманих даних та одержання кінцевого масиву дискретизованих значень.

Перші три точки дискретизованого профілю визначаються на початку інтервалу пошуку в точці ind_s та відповідно дорівнюють значенням напруженості, отриманим за допомогою кожної із трьох антен A , B і C (блок 3, рис. 2.6).

Оскільки отримані вхідні дані містять завади, то при їх інтерполяції практично неможливо отримати три ідентичні набори даних для трьох антен. Тому пошук значень профілю виконують, не порівнюючи пари значень, а шукаючи діапазони, в яких виконується умова входження даних в дозволений діапазон.

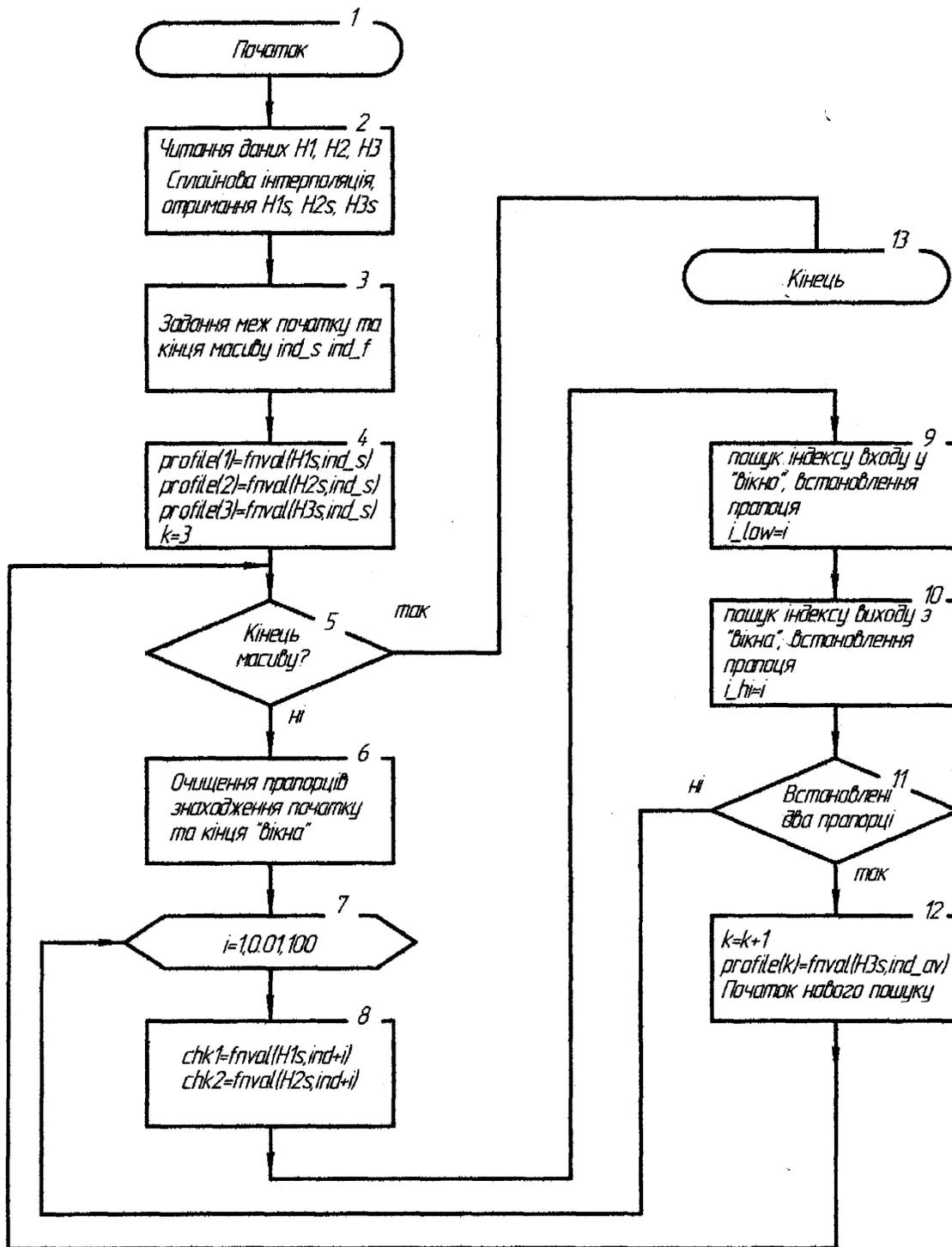


Рис. 2.6. Алгоритм отримання дискретизованого профілю горизонтальної складової напруженості магнітного поля

Наприклад, для пошуку значення H_4 профілю напруженості (рис 2.7.) спочатку знаходять нижній індекс i_l , де починають виконуватись умови

$Ha_{i_l} > H_2 - \frac{\alpha}{2}H_2$ та $Hb_{i_l} > H_3 - \frac{\alpha}{2}H_3$, де α - коефіцієнт, який визначає ширину дозволеного діапазону ($\alpha = 0,015$), а потім визначають верхній індекс i_h , де ще виконуються умови $Ha_{i_h} < H_2 + \frac{\alpha}{2}H_2$ та $Hb_{i_h} < H_3 + \frac{\alpha}{2}H_3$. На основі отриманих індексів отримують індекс $i = (i_h + i_l)/2$. Подальший пошук відбувається аналогічно. Таким чином $H_4 = Hc_i$. Така методика дозволяє точніше знаходити точки профілю. В алгоритмі він зображений блоками 5 – 12 (рис. 2.6).

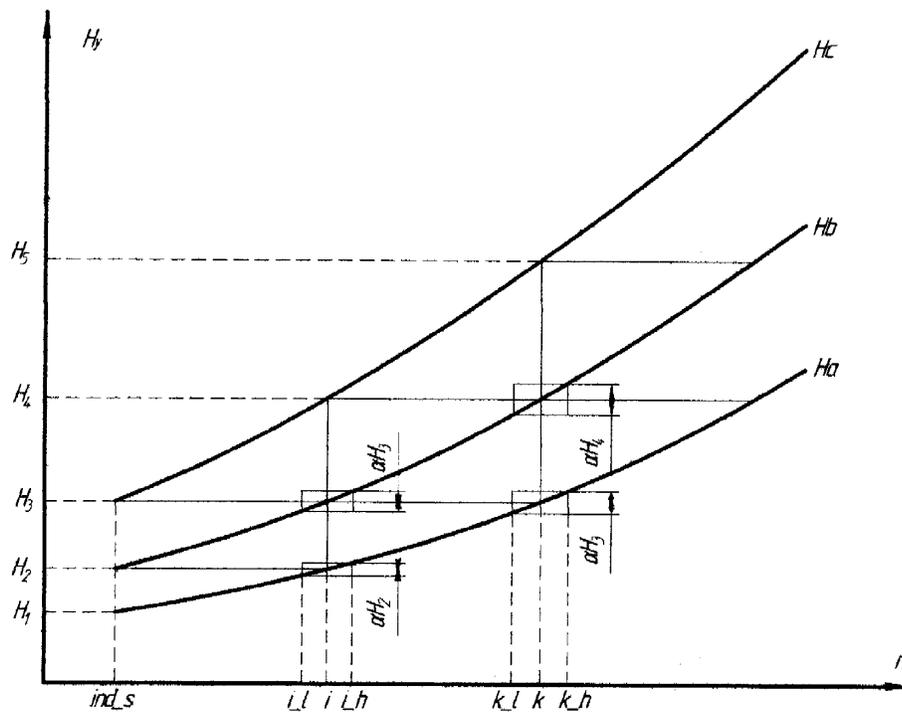


Рис. 2.7. Визначення точок профілю горизонтальної складової напруженості магнітного поля

Використання згладжуючої сплайнової інтерполяції дозволяє визначати проміжні значення між вимірними даними. В запропонованому алгоритмі додатково обчислюється 100 проміжних точок між наявними вимірними даними (блоки 7 – 8, рис. 2.6).

Алгоритм закінчує роботу по досягненню кінця наявних даних в масиві даних. Після цього в масиві *profile* будуть міститися дані, які відповідають

дискретизації профілю горизонтальної складової напруженості магнітного поля з кроком Δu .

Перевірка роботи запропонованого способу фіксації точок, що відповідають приростам Δu , при наявності завад здійснювалася методами числового моделювання. Для цього задавалися випадковим чином вихідні дані (струм, крок Δu , глибина залягання трубопроводу, відстань до умовного початку координат, рівень завад). Завади вибиралися адитивними, їх рівень складав до 7% максимального значення корисного сигналу.

Тип завад вибирався на основі проведених дослідів. При визначенні напруженості магнітного поля спочатку вимірювався середній рівень завад, який приймався за нуль. В процесі вимірювання напруженості цей рівень віднімався від виміряного корисного сигналу.

Спосіб реалізований в середовищі MATLAB та приведений в додатку А, а результати його перевірки приведені в табл. 2.1. Як видно із отриманих результатів, максимальна відносна похибка визначення напруженості є не більшою 1,5%.

Таблиця 2.1

Результати перевірки роботи способу визначення профілю напруженості магнітного поля над одним трубопроводом

I, A	z, m	d, m	Максимальна відносна похибка $H_u, \%$
1,34	0,815	1,97	1,15
1,89	1,05	1,81	0,38
1,60	0,91	1,62	0,37
1,13	0,97	1,67	0,37
1,20	0,61	1,89	1,30
0,34	1,73	1,72	0,88
0,20	1,12	1,50	1,04

Ілюстрація двох процесів профілювання приведена на рис. 2.8. Згенеровані профілі із накладеною завадою (рис. 2.8, а, б) інтерполують згладжуючим сплайном (рис. 2.8, в, г).

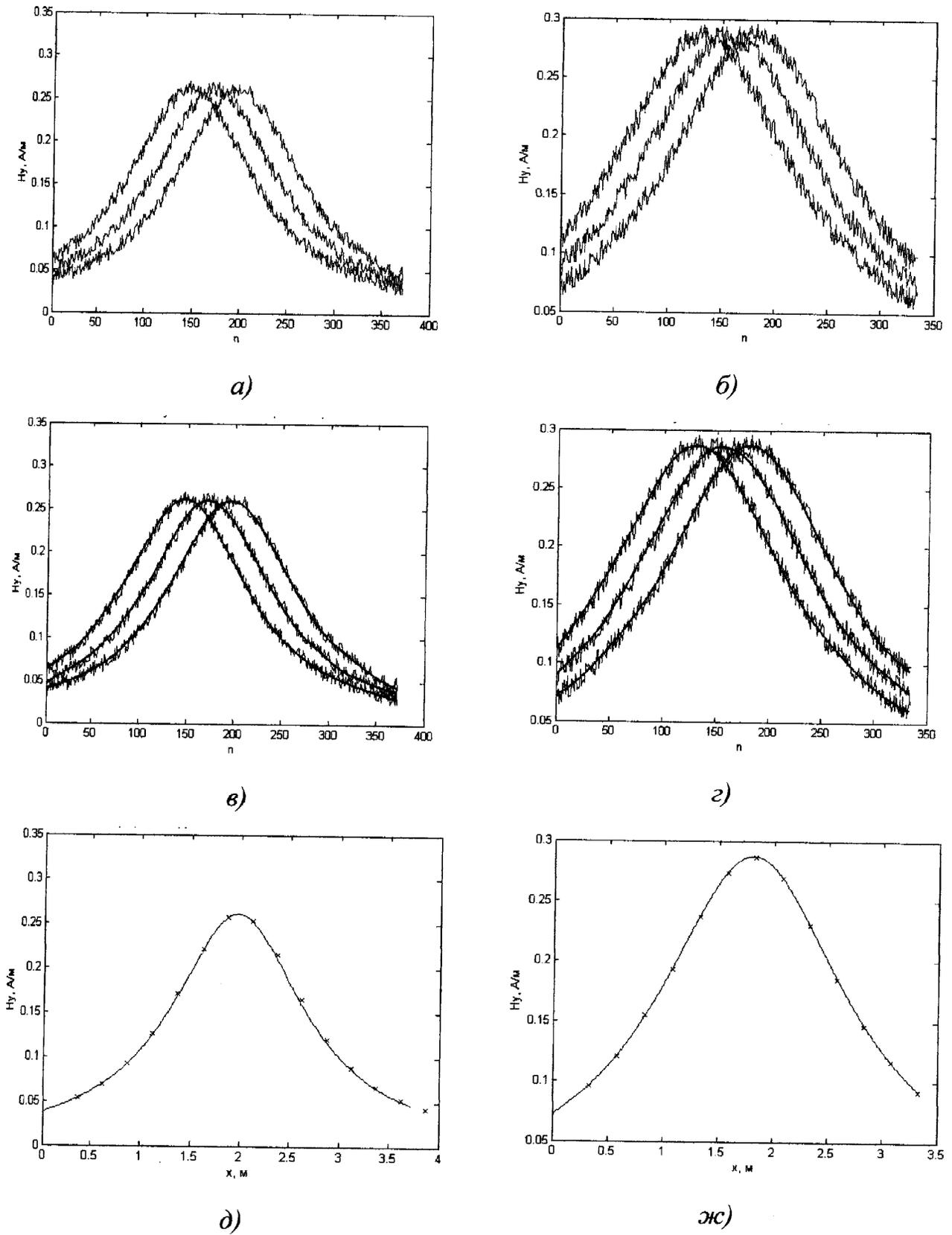


Рис. 2.8. Приклади процесу профілювання напруженості магнітного поля:

а, в, д – процес профілювання за першим набором згенерованих даних;

б, г, ж - процес профілювання за другим набором згенерованих даних

Отримані точки дискретизованого профілю для двох наборів згенерованих даних приведені на (рис. 2.8, д, ж).

Робота способу була перевірена і на реальних даних з використанням програми, написаної в середовищі MATLAB (додаток Б). На рис. 2.9 приведено результат розрахунку профілю по експериментальних даних, які наведені на рис. 2.5.

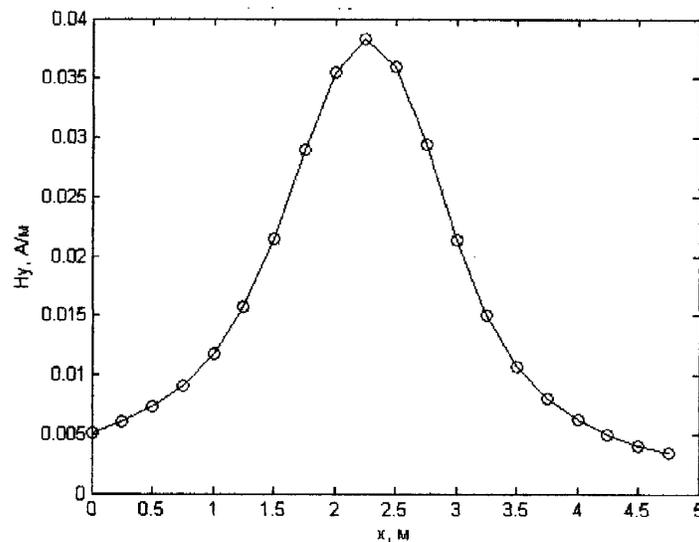


Рис. 2.9. Приклад отримання профілю напруженості на основі експериментальних даних рис. 2.5

Робота способу можлива і для декількох паралельних трубопроводів, оскільки графік профілю горизонтальної складової напруженості магнітного поля є неперервним і не має розривів. Маючи додатково виміряні значення вертикальної складової напруженості магнітного поля, можна також таким чином отримати і її дискретизований профіль.

Використання разом із горизонтально розміщеними антенами вертикально розміщених магнітних антен дає змогу отримувати профіль вертикальної складової напруженості магнітного поля і контролювати отримання профілю горизонтальної складової напруженості магнітного поля.

Для запобігання виникнення похибок при використанні запропонованого способу профілювання необхідно виконувати переміщення блока магнітних

антен в площині, перпендикулярній до осі трубопроводів. На практиці таку орієнтацію виконують за мінімальним значенням поздовжньої складової магнітного поля підземних трубопроводів, що і буде відповідати перпендикулярному положенню блока магнітних антен по відношенню до осей підземних трубопроводів.

Ще одним джерелом похибок може бути нахил та вертикальне переміщення блоку антен. Для зменшення таких похибок пропонується використовувати у вимірювальній системі інклінометр та акселерометр. Наприклад, суміщений інклінометр та акселерометр ADIS16209 дозволяє визначати кут нахилу системи антен з похибкою $0,1^\circ$, та прискорення з похибкою $2,4 \times 10^{-3} \text{ м/с}^2$. Завдяки цьому вказаний інклінометр/акселерометр буде сигналізувати про відхилення системи магнітних антен від необхідного положення.

2.4. Застосування нейромереж для безконтактного визначення струмів в стінках підземних трубопроводів

Використання штучних нейронних мереж (ШНМ) дає змогу визначати струм у стінках трубопроводу на основі отриманого згідно п. 2.3 профілю напруженості магнітного поля. При цьому підвищення точності результатів обчислень відбуватиметься за рахунок використання надлишкової кількості вхідних даних.

Процес проектування нейронної мережі складається з таких етапів [55]:

- вибір конфігурації нейромережі,
- генерування наборів взірцевих даних,
- навчання нейромережі,
- перевірка правильності роботи нейромережі.

Функції переходу від величини струму в стінках трубопроводу до значення напруженості магнітного поля наведені в п.2.1: (2.3), (2.4) для одного трубопроводу та (2.7), (2.8) для декількох паралельних трубопроводів.

Вхідними даними, які будуть поступати на вхід штучної нейронної мережі, може бути профіль горизонтальної, вертикальної або одночасно обох складових напруженості магнітного поля над підземними трубопроводами. Згідно з розробленим і описаним вище способом одержання дискретизованого профілю горизонтальної складової напруженості магнітного поля (п. 2.3) на вхід ШНМ будуть подаватися дані такого профілювання.

При розробці ШНМ використано її властивість апроксимації функцій [56]. Функції, що будуть апроксимуватися нейронною мережею, для одного та декількох трубопроводів відповідно будуть такими:

$$(I, z, d) = f_1(H_{y1}, H_{y2}, \dots, H_{yn}), \quad (2.40)$$

$$(I_1, z_1, d, I_2, z_2, b_2, \dots) = f_n(H_{y1}, H_{y2}, \dots, H_{yn}). \quad (2.41)$$

Вхідними даними для ШНМ є значення дискретизованого профілю горизонтальної складової напруженості магнітного поля в n точках $H_{y1}, H_{y2}, \dots, H_{yn}$, а вихідними параметрами є $I, I_1, I_2, \dots, z, z_1, z_2, \dots, d, b_2, b_3, \dots$.

2.4.1. Розроблення нейромережі для контролю струму в стінці одного підземного трубопроводу

Для вибору конфігурації та структури ШНМ для конкретної задачі немає єдиного правила. Розроблення нейронної мережі в основному базується на досвіді розробника та правильному проведенні її дослідження.

Для апроксимації функції (2.40) найбільш підходить конфігурація мережі типу «багатошаровий персептрон» [56].

Перед початком проектування ШНМ потрібно задатися межами, в яких будуть лежати значення змінних. Нехай сила струму I змінюється від 0 до 10

А, глибина залягання z від 0,3 до 5 м, d від 1 до 5 м. Моделювання ШНМ здійснювалося в середовищі Matlab та Neural Network Toolboxes.

На вхід мережі подають дискретизовані значення напруженості магнітного поля, провівши перетворення яких, ШНМ на виході видає інформативні параметри. Вихідними значеннями будуть значення струму I , глибина залягання z та відстань d осі відносно точки початку вимірювання [57].

Для вирішення поставленої задачі для одного трубопроводу на основі проведених експериментальних досліджень різних конфігурацій ШНМ пропонується використання тришарової нейромережі, яка має: входів – 30, виходів – 3; параметри першого шару: передавальна функція logsig , кількість нейронів – 25; параметри другого шару: передавальна функція logsig , кількість нейронів – 15; параметри третього шару: передавальна функція pureline , кількість нейронів – 3 (рис. 2.10).

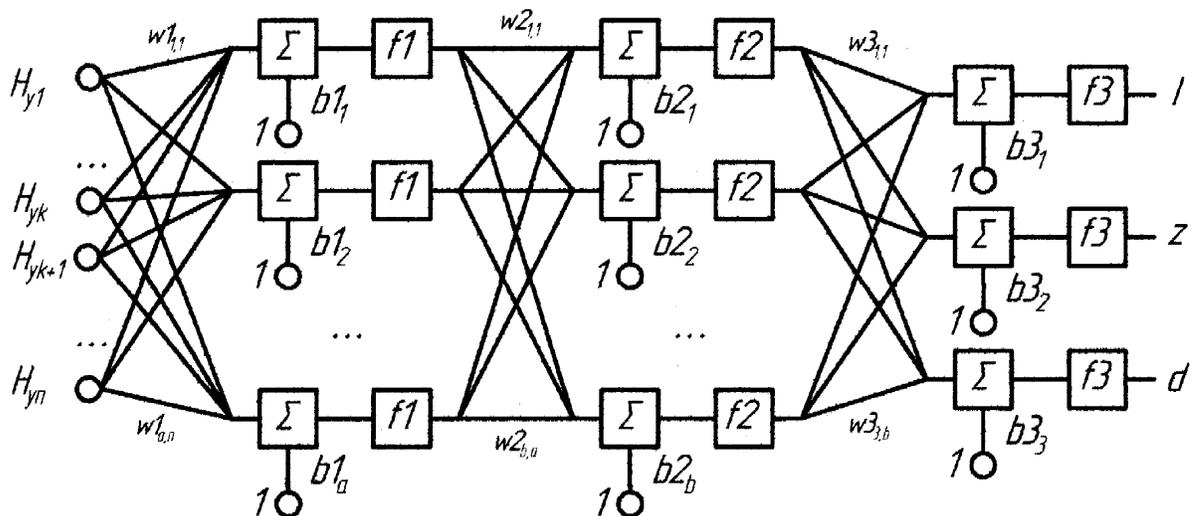


Рис. 2.10. Структура нейромережі для визначення інформативних параметрів одного трубопроводу

В якості передавальних функцій експериментально перевірялася можливість використання logsig (рис. 2.11, а), tansig (рис. 2.11, б) та pureline (рис. 2.11, в) функцій. В результаті встановлено, що оптимальною передавальною функцією для вхідного і прихованих шарів є функція logsig (рис. 2.11, а), а для вихідного шару - функція pureline (рис. 2.11, в).

Кількість нейронів у першому шарі визначається кількістю точок профілю. Кількість нейронів у вихідному шарі визначається кількістю невідомих даних, які будуть обчислюватися. Кількість нейронів в прихованому шарі визначалася експериментально за найменшою похибкою роботи ШНМ.

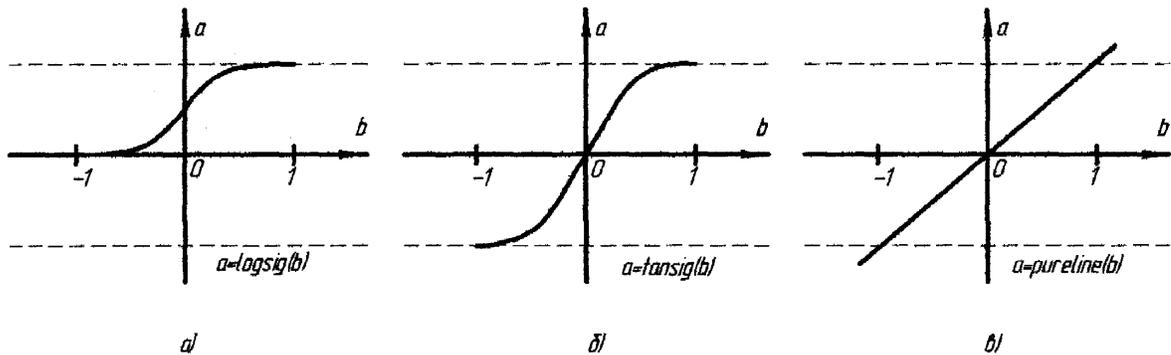


Рис. 2.11. Передавальні функції ШНМ

Оскільки залежність між вхідними і вихідними даними є нелінійною, то в першому і другому шарі використовується logsig функція (рис. 2.11, *a*). Для останнього шару передавальна функція є лінійною (pureline), що забезпечує одержання на виході значень, більших від одиниці.

Оскільки передавальна функція logsig видає результати в діапазоні зміни аргумента від -1 до 1, то вхідні дані необхідно привести до діапазону [-1, 1].

Перед початком роботи ШНМ необхідно провести її навчання. Процес навчання полягає у підборі таких вагових коефіцієнтів w_1 , w_2 і w_3 та зміщень b_1 , b_2 і b_3 (рис. 2.10.), при яких нейромережа повинна видавати правильні значення сили струму і глибини залягання при подачі на вхід параметрів профілю напруженості магнітного поля.

В якості функції для тренування ШНМ використовується функція trainlm [58, 59], яка модифікує значення вагових коефіцієнтів і зміщень згідно методу оптимізації Левенберга-Марквардта. Даний метод забезпечує стабільність роботи і високу збіжність процесу тренування ШНМ [58].

Для генерування навчального набору даних була створена програма, яка формує 2000 довільних наборів значень сили струму глибини залягання та

відстані від точки початку вимірювань до осі трубопроводу d і, відповідно, 2000 профілів напруженості магнітного поля для таких даних.

Синтез нової ШНМ в системі Matlab відбувалося за допомогою команди `newff`, після чого задавалися параметри цієї мережі та виконувалося навчання. Для підвищення якості навчання та отримання ШНМ, яка буде мати вищу точність обчислень, до 1000 навчальних профілів горизонтальної складової напруженості магнітного поля додавали адитивну похибку величиною до 10% від максимального значення профілю.

У процесі навчання як функцію оцінки процесу навчання використано суму квадратних відхилень виходів сітки від еталонів. Критерієм закінчення навчання буде сума квадратів відхилень виходів ШНМ від навчальних даних, значення якого повинно бути меншим від $5 \cdot 10^{-7}$. Максимальна кількість циклів навчання задається рівною 10000, що дозволяє запобігати зациклюванню програми. Процес навчання, який полягає у підборі вагових коефіцієнтів та зміщень, представлений графіком залежності оцінки функціонування ШНМ від номера циклу навчання (рис. 2.12).

Перед тим, як користуватися ШНМ, виконується дослідження ступеня вірогідності результатів обчислення мережі на тестовому масиві вхідних векторів. Як тестовий слід використовувати масив, компоненти якого відрізняються від навчального масиву.

Для оцінки вірогідності результатів роботи нейромережі можна використати результати регресійного аналізу, які отримують шляхом порівняння еталонних значень із значеннями, одержаними на виході, коли на входи подають вектори тестового масиву. В середовищі Matlab для таких цілей використовувалася команда `postreg` [60].

Як видно із проведеного регресійного аналізу на графіках (рис. 2.13, рис. 2.14) немає значних відхилень точок тестового масиву, що свідчить про якісне навчання ШНМ. Всі тестові точки лежать на прямій, що свідчить про правильну роботу ШНМ.

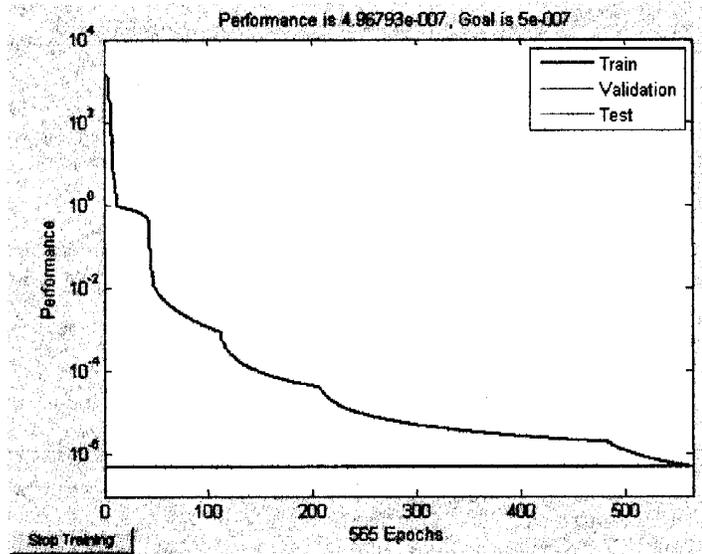


Рис. 2.12. Залежність похибки роботи ШНМ в процесі її навчання від номера циклу навчання

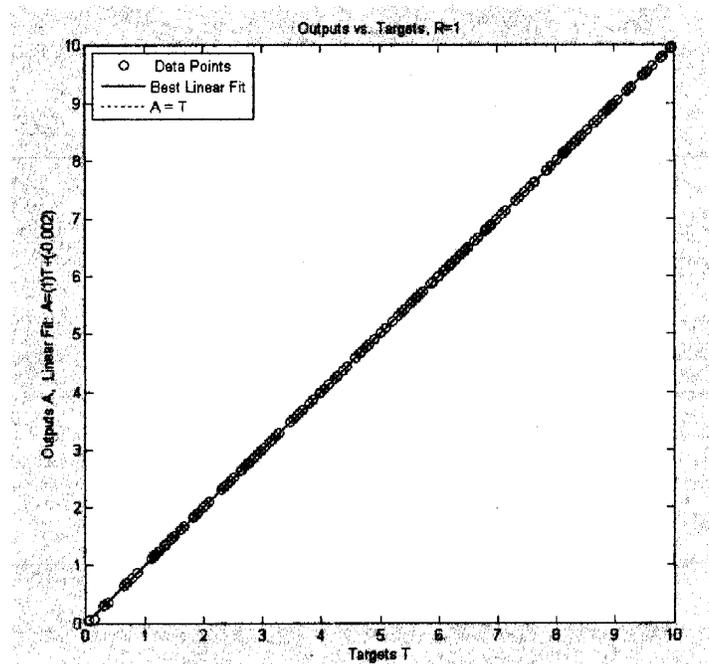


Рис. 2.13. Перевірка точності визначення ШНМ значень сили струму

Роботу розробленої ШНМ перевірено числовим моделюванням. Для цього генерувалися випадкові значення I, z, d . На їх основі розраховували профілі горизонтальної складової напруженості магнітного поля, додавали адитивні похибки і по таких даних отримана ШНМ розраховувала вихідні параметри. Похибки, які генерувалися за рівномірним законом розподілу, мали випадковим чином задане зміщення відносно профілю напруженості

магнітного поля. Результати перевірки роботи ШНМ для контролю ізоляційного покриття одного підземного трубопроводу приведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2.

Результати числового моделювання роботи розробленої ШНМ для одного трубопроводу

Вихідні дані			Пох. $H_y, \%$	Обчислені дані			Відносна похибка, %		
I, A	z, m	d, m		I, A	z, m	d, m	I	z	d
0,811	1,913	4,658	0	0,810	1,914	4,659	0,06	0,03	0,01
1,732	1,860	4,122	0	1,732	1,862	4,121	0,01	0,06	0,01
0,485	2,763	3,443	0	0,485	2,763	3,442	0,07	0,01	0,01
0,530	1,061	2,452	1	0,534	1,058	2,450	0,69	0,29	0,08
0,179	1,044	3,862	1	0,179	1,043	3,855	0,04	0,1	0,19
1,754	1,284	2,313	1	1,758	1,297	2,308	0,22	0,96	0,2
0,651	1,475	2,751	2	0,647	1,458	2,741	0,61	1,15	0,36
0,379	0,617	2,789	2	0,374	0,612	2,796	1,41	0,67	0,25
1,678	2,626	3,743	2	1,682	2,664	3,751	0,23	1,43	0,21
1,939	0,755	4,398	3	1,977	0,760	4,369	1,99	0,67	0,65
0,764	1,403	2,030	3	0,769	1,406	2,078	0,72	0,25	2,34
1,799	0,524	3,759	3	1,780	0,539	3,745	1,05	2,79	0,37
0,715	1,377	2,881	5	0,708	1,357	2,890	0,91	1,52	0,31
0,337	2,033	5,737	5	0,328	2,055	5,772	2,64	1,08	0,62
1,234	0,660	2,317	5	1,206	0,659	2,328	2,3	0,22	0,48
Максимальна похибка							2,64	2,79	2,34

Отже із отриманих результатів видно, що ШНМ для визначення струму в стінці одного трубопроводу розроблена вірно. Текст програми, яка реалізовує таку ШНМ, приведений в додатку В.

2.4.2. Розроблення нейромережі для безконтактного визначення струмів у стінках двох паралельних підземних трубопроводів

Розроблення ШНМ для двох паралельних електрично з'єднаних трубопроводів здійснено аналогічно, як і для одного підземного трубопроводу.

В якості ШНМ, яка може виконати апроксимацію функції (2.41), вибрано тришарову нейромережу. Така ШНМ має: входів – 30, виходів – 6; параметри першого шару: передавальна функція *logsig*, кількість нейронів – 25; параметри другого шару: передавальна функція *logsig*, кількість нейронів – 15; параметри третього шару: передавальна функція *pureline*, кількість нейронів – 6.

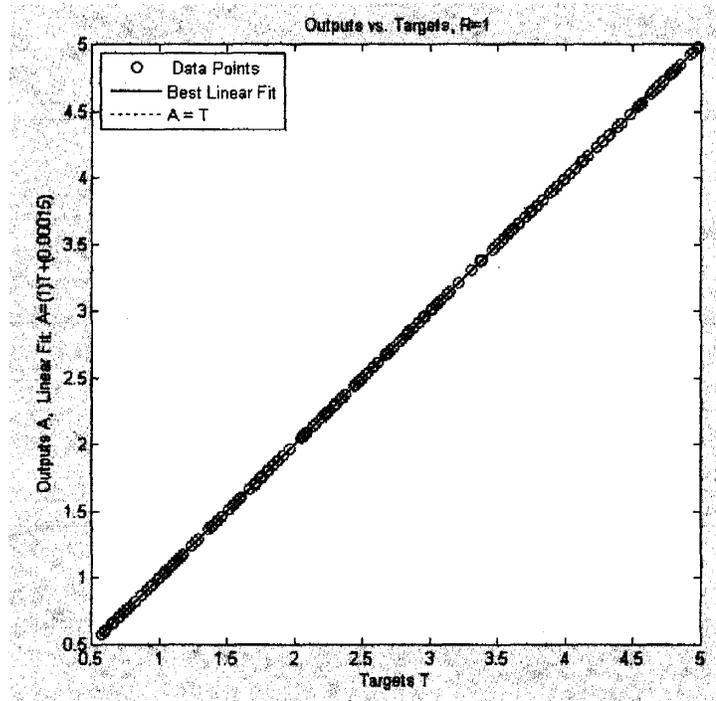


Рис. 2.14. Графік результатів регресійного аналізу для перевірки точності визначення ШНМ значень глибини залягання трубопроводу

В якості вихідних даних ШНМ будуть значення струмів I_1 , I_2 в кожному із двох трубопроводів, глибини залягання цих трубопроводів z_1 , z_2 та параметри d і b .

Тренування такої ШНМ також відбувалося на 2000 навчальних даних, що склалися із профілів напруженості горизонтальної складової магнітного поля та відповідних їм значень інформативних параметрів I_1 , I_2 , z_1 , z_2 , d , b . На 1000 даних на профіль додатково накладалися завади величиною до 5%. Відстань між трубопроводами задавалася від 0,5 до 4 м.

Роботу ШНМ для визначення інформативних параметрів при контролі

ізоляційного покриття двох трубопроводів також було перевірено числовим моделюванням. Результати перевірки приведені в табл. 2.3. Максимальна похибка визначення відстані між трубопроводами b становить 5,1%.

Таблиця 2.3.

Результати моделювання роботи ШНМ для двох трубопроводів

Вихідні дані					Пох. H_y , %	Обчислені дані				Відносна похибка, %			
I_1 , А	z_1 , м	I_2 , А	z_2 , м	b , м		I_1 , А	z_1 , м	I_2 , А	z_2 , м	I_1	z_1	I_2	z_2
1,15	1,71	0,56	2,01	1,4	0	1,14	1,72	0,57	2,01	0,99	0,39	1,31	0,14
1,33	2,44	0,84	1,29	3,67	0	1,31	2,42	0,84	1,27	1,24	0,49	0,19	1,42
0,82	1,88	0,16	2,43	0,98	0	0,79	1,91	0,16	2,4	3,39	1,97	2,56	0,98
1,45	1,11	0,76	1,05	3,21	1	1,43	1,11	0,78	1,05	1,24	0,18	1,49	0,1
1,17	2,92	1,17	1,03	3,87	1	1,16	2,93	1,15	1,03	0,49	0,07	1,61	0,4
0,83	2,75	0,39	2,8	0,54	1	0,81	2,76	0,4	2,76	2,37	0,32	2,56	1,45
1,01	1,98	0,7	1,95	2,78	2	1	1,98	0,72	1,92	1,44	0,04	3,07	1,03
0,62	2,84	1,4	2,04	1,53	2	0,64	2,81	1,37	2,01	2,85	0,97	1,75	1,4
0,89	2,42	0,14	1,85	1,01	2	0,86	2,43	0,14	1,82	2,73	0,64	2,8	1,44
1,3	1,73	0,65	2,43	0,75	4	1,26	1,77	0,67	2,43	3,07	2,22	2,99	0,08
0,79	0,84	0,46	1,79	4,08	4	0,77	0,86	0,45	1,79	2,3	3,28	1,69	0,26
0,74	1,56	1,18	2,69	2,56	4	0,74	1,62	1,16	2,66	0,02	3,53	1,54	1,07
0,74	1,19	1,47	1,6	3,28	5	0,74	1,21	1,49	1,58	0,79	2,32	1,72	1,66
1,2	1,56	1,34	0,92	1,03	5	1,16	1,53	1,35	0,95	3,45	2,11	0,86	3,2
0,75	2,31	0,24	2,86	0,65	5	0,78	2,35	0,24	2,83	4,13	1,78	1,17	0,74
Максимальна похибка										4,13	3,53	3,07	3,20

Як видно із отриманих результатів, навчання та розроблення структури ШНМ для визначення струмів у стінках двох підземних трубопроводів виконані правильно. Текст програми, яка дозволяє отримати таку ШНМ для визначення сили струму в стінках кожного із двох трубопроводів приведений в додатку Д.

Нейронні мережі дозволяють визначати струми та глибини залягання паралельних трубопроводів при неруйнівному контролі ізоляційного покриття підземних трубопроводів. До переваг використання ШНМ можна віднести високу швидкість роботи при опрацюванні вхідних даних, їх адаптивність і універсальність. Розроблені ШНМ можна використовувати як при контролі

ізоляційного покриття одного, так і двох трубопроводів, що підтверджується результатами числового моделювання.

Маючи дані профілювання вертикальних складових напруженості магнітного поля аналогічно можна також натренувати ШНМ для визначення на їх основі струму в стінках підземних трубопроводів.

2.5. Визначення струмів у стінках підземних трубопроводів шляхом використання методики умовно-нормальних рівнянь

Аналізуючи залежності (2.3) і (2.4), можна встановити, що для визначення інформативних параметрів при контролі ізоляційного покриття одного трубопроводу достатньо провести вимірювання напруженості магнітного поля в трьох точках на поверхні землі і отримати три пари значень (H_y, y) або (H_z, y) . На основі таких пар вимірних даних можна скласти систему із трьох рівнянь, розв'язавши яку можна знайти значення I, z, d .

Аналогічно, проаналізувавши залежності (2.7) і (2.8) для двох паралельних трубопроводів, можна сказати, що отримавши шість пар значень (H_y, y) або (H_z, y) можна скласти систему із шести рівнянь із шістьма невідомими, розв'язавши яку можна визначити значення I_1, I_2, z_1, z_2, d, b .

Використання способу профілювання, описаного в п. 2.3, дозволяє отримувати значно більшу, ніж мінімально необхідну вказану вище кількість пар значень (H_y, y) чи (H_z, y) . Так, наприклад, на відстані 3 м. від початку визначення профілю буде 13 пар значень при відстані між блоками антен $\Delta y = 0,25$ м., а на відстані 9 м. – 37 пар. Використання надлишкової кількості пар даних дозволить підвищити точність результатів безконтактного визначення струмів у стінках підземних трубопроводів, що можна здійснити шляхом використання для цих цілей відомої методики умовно-нормальних рівнянь.

2.5.1. Визначення струму в стінках одного підземного трубопроводу шляхом використання методики умовно-нормальних рівнянь

Оскільки після проведення вимірювань напруженостей над одним трубопроводом відстань d від першої точки до осі трубопроводу так само, як і параметри z , I є невідомими, а кількість пар даних n профілю напруженості магнітного поля суттєво перевищує кількість невідомих, то на основі виразів (2.3) і (2.4) можна записати n умовних рівнянь [61] виду:

$$H_{yi} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{Iz}{z^2 + (y_i - d)^2} \quad (2.42)$$

і n умовних рівнянь виду:

$$H_{zi} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{I(y_i - d)}{z^2 + (y_i - d)^2}, \quad (2.43)$$

кожне із яких описує однакового виду залежність $H_y = f_1(I, z, y, d)$ чи залежність $H_z = f_2(I, z, y, d)$, відповідно, де H_{yi} чи H_{zi} і y_i - визначені в процесі профілювання дані, отримані у вигляді вказаних вище пар значень.

Маючи n умовних рівнянь, наприклад, виду (2.42), необхідно на їх основі отримати певну значно меншу кількість (три) нормальних рівнянь [61], в результаті розв'язку яких можна визначити d , I , z . Це дасть змогу зменшити вплив завад, які будуть мати місце в даних вимірювань профілю напруженості магнітного поля на результати розрахунку d , I , z .

Продемонструємо одержання нормальних рівнянь на основі n умовних рівнянь виду (2.42) для одного трубопроводу. Для цього перетворимо умовні рівняння (2.42) до такого вигляду:

$$Iz - 2\pi H_{yi} z^2 - 2\pi H_{yi} y_i^2 + 4\pi H_{yi} y_i d - 2\pi H_{yi} d^2 = 0. \quad (2.44)$$

Умовні рівняння виду (2.44) представимо так:

$$a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + a_{i3}x_3 = c_i, \quad (2.45)$$

де складові (2.45) є такими:

$$\begin{aligned} x_1 &= Iz, \\ x_2 &= z^2 + d^2, \\ x_3 &= d, \\ a_{i1} &= 1, \\ a_{i2} &= -2\pi H_{yi}, \\ a_{i3} &= 4\pi H_{yi}y_i, \\ c_i &= 2\pi H_{yi}y_i^2, \\ i &= 1 \div n. \end{aligned}$$

Для одержання першого нормального рівняння кожне із умовних рівнянь (2.45) перемножують на коефіцієнт при x_1 і після цього просумовують одержані рівняння. Для одержання другого нормального рівняння кожне із умовних рівнянь (2.45) перемножують на коефіцієнт при x_2 і після цього просумовують отримані рівняння і т.д. [61].

В результаті такої процедури отримуємо таку систему із трьох нормальних рівнянь:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n (a_{i1}^2)x_1 + \sum_{i=1}^n (a_{i1}a_{i2})x_2 + \sum_{i=1}^n (a_{i1}a_{i3})x_3 = \sum_{i=1}^n (c_i a_{i1}), \\ \sum_{i=1}^n (a_{i2}a_{i1})x_1 + \sum_{i=1}^n (a_{i2}^2)x_2 + \sum_{i=1}^n (a_{i2}a_{i3})x_3 = \sum_{i=1}^n (c_i a_{i2}), \\ \sum_{i=1}^n (a_{i3}a_{i1})x_1 + \sum_{i=1}^n (a_{i3}a_{i2})x_2 + \sum_{i=1}^n (a_{i3}^2)x_3 = \sum_{i=1}^n (c_i a_{i3}). \end{cases} \quad (2.46)$$

Розв'язавши (2.46) відносно $x_1 \div x_3$, знаходимо значення параметрів d ,

z, I таким чином:

$$d = x_3, z = \sqrt{x_2 - d^2}, I = x_1/z. \quad (2.47)$$

Аналогічно можна одержати нормальні рівняння на основі умовних рівнянь виду (2.43), розв'язавши які можна буде також визначити значення d, z, I .

З метою перевірки запропонованої методики було проведено числове моделювання з її використанням для визначення параметрів одного підземного трубопроводу [62-63]. Текст програми для такого числового моделювання написаний в середовищі MATLAB і приведений в додатку Е. При цьому були згенеровані випадковим чином вихідні дані d, I, z для одного трубопроводу. В подальшому на основі цих баз даних згідно описаної методики були отримані нормальні рівняння, розв'язок яких дав змогу отримати значення параметрів I, z, d для одного трубопроводу (табл. 2.4).

Таблиця 2.4.

Результати числового моделювання використання методики умовно-нормальних рівнянь для одного трубопроводу

Вихідні дані			Пох $H_y, \%$	Обчислені дані			Відносна похибка, %		
I, A	$z, м$	$d, м$		I, A	$z, м$	$d, м$	I	z	d
0,481	2,897	3,849	0	0,481	2,897	3,849	0,00	0,00	0,00
0,796	0,880	5,424	0	0,796	0,880	5,424	0,00	0,00	0,00
0,103	1,449	4,055	0	0,103	1,449	4,055	0,00	0,00	0,00
0,32	0,70	2,55	1	0,32	0,70	2,55	0,01	0,10	0,01
0,25	1,34	3,12	1	0,25	1,34	3,12	0,49	0,05	0,01
0,60	0,63	5,17	1	0,60	0,63	5,17	0,48	0,01	0,01
0,83	0,77	3,18	2	0,83	0,77	3,19	0,22	0,35	0,02
0,50	1,72	5,45	2	0,50	1,72	5,44	0,89	0,08	0,06
0,21	1,38	4,29	2	0,21	1,38	4,30	1,06	0,03	0,07
0,22	0,71	3,91	3	0,22	0,71	3,91	0,18	0,12	0,02
0,38	0,56	5,73	3	0,38	0,56	5,72	1,03	0,30	0,01
0,68	0,73	2,84	3	0,67	0,73	2,84	1,54	0,30	0,04
0,86	1,52	4,95	5	0,86	1,52	4,96	0,26	0,13	0,08
0,85	2,35	5,15	5	0,86	2,35	5,15	1,30	0,12	0,04
0,47	0,92	3,44	5	0,46	0,92	3,44	1,84	0,15	0,04
Максимальна похибка							1,84	0,35	0,08

2.5.2. Визначення струмів у стінках двох паралельних електрично з'єднаних трубопроводів шляхом використання методики умовно-нормальних рівнянь

Розглянемо методику одержання умовних і нормальних рівнянь для двох підземних трубопроводів на основі рівнянь (2.7), (2.8).

Умовні рівняння на базі даних H_{yi} будуть такими:

$$H_{yi} = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{I_1 z_1}{z_1^2 + (y_i - d)^2} + \frac{I_2 z_2}{z_2^2 + (y_i - d - b)^2} \right], \quad (2.48)$$

а на базі H_{zi} такими:

$$H_{zi} = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{I_1 (y_i - d)}{z_1^2 + (y_i - d)^2} + \frac{I_2 (y_i - d - b)}{z_2^2 + (y_i - d - b)^2} \right]. \quad (2.49)$$

Маючи n умовних рівнянь, наприклад, виду (2.48), необхідно на їх основі отримати відповідну кількість нормальних рівнянь, у результаті розв'язку яких можна буде визначити I_1 , I_2 , z_1 , z_2 , b , d . Це аналогічно як із одним підземним трубопроводом дасть змогу зменшити вплив завад, які будуть мати місце у визначених згідно п. 2.3 даних профілю напруженості магнітного на результати розрахунку I_1 , I_2 , z_1 , z_2 , b , d .

Продемонструємо одержання нормальних рівнянь на основі n умовних рівнянь виду (2.48) для двох трубопроводів. Для цього перетворимо рівняння (2.48) до умовних рівнянь такого виду:

$$a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + a_{i3}x_3 + a_{i4}x_4 + a_{i5}x_5 + a_{i6}x_6 + a_{i7}x_7 = c_i, \quad (2.50)$$

де складові (2.50) є такими:

$$x_1 = I_1 z_1 + I_2 z_2,$$

$$\begin{aligned}
x_2 &= b + 2d, \\
x_3 &= dI_1 \cdot z_1 + dI_2 \cdot z_2 + bI_1 z, \\
x_4 &= I_1 z_1 z_2^2 + d^2 I_1 z_1 + 2dI_1 z_1 b + I_1 z_1 b^2 + I_2 z_2 z_1^2, \\
x_5 &= z_1^2 z_2^2 + z_1^2 b^2 + d^2 (z_1^2 + z_2^2 + b^2) + d^4 + 2dz_1^2 b, \\
x_6 &= z_1^2 + z_2^2 + b^2 + 6db + 6d^2, \\
x_7 &= d(z_1^2 + z_2^2 + b^2) + z_1^2 b + 3d^2 b + 2d^3, \\
a_{i1} &= y_i^2, \\
a_{i2} &= 4\pi H_{yi} y_i^3, \\
a_{i3} &= -2y_i, \\
a_{i4} &= 1, \\
a_{i5} &= -2\pi H_{yi}, \\
a_{i6} &= -2\pi H_{yi} y_i^2, \\
a_{i7} &= 4\pi H_{yi} y_i, \\
c_i &= 2\pi H_{yi} y_i^4, \quad i = 1 \div n.
\end{aligned}$$

Слід відмітити, що кількість умовних рівнянь (2.48) і (2.50) дорівнює n , де n – кількість пар даних, отриманих в результаті профілювання. Перетворення від (2.48) до (2.50) з метою недопущення помилок було виконано в середовищі відомого програмного продукту Maple.

В результаті переходу від умовних рівнянь (2.50) до нормальних рівнянь отримаємо таку систему нормальних рівнянь:

$$\begin{cases}
\sum_{k=1}^7 \left(x_k \sum_{i=1}^n (A_{i,1} A_{i,k}) \right) = \sum_{i=1}^n (A_{i,1} C_i), \\
\sum_{k=1}^7 \left(x_k \sum_{i=1}^n (A_{i,2} A_{i,k}) \right) = \sum_{i=1}^n (A_{i,2} C_i), \\
\vdots \\
\sum_{k=1}^7 \left(x_k \sum_{i=1}^n (A_{i,7} A_{i,k}) \right) = \sum_{i=1}^n (A_{i,7} C_i),
\end{cases} \quad (2.51)$$

$$\text{де } A_{i,j} = \begin{pmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \dots & a_{1,j} & \dots & a_{1,k} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \dots & a_{2,j} & \dots & a_{2,k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{i,1} & a_{i,2} & \dots & a_{i,j} & \dots & a_{i,k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n,1} & a_{n,2} & \dots & a_{n,j} & \dots & a_{n,k} \end{pmatrix},$$

$$j = 1 \div k,$$

$$k = 7.$$

Розв'язавши систему рівнянь (2.51), знаходимо змінні $x_1 \div x_7$, на основі яких визначаємо параметри I_1, I_2, z_1, z_2, b, d .

Параметр d знаходимо шляхом розв'язку такого рівняння, яке також отримане за допомогою персонального комп'ютера і програмного середовища Maple:

$$8x_6x_2^2d^2 - x_6^2x_2d + x_6x_2x_7 - 16d^3x_6x_2 + 4d^2x_2x_7 - x_7^2 - 16x_2^3d^3 + (2.52) \\ + 8d^4x_6 + d^2x_6 - 48d^5x_2 + 48d^4x_2^2 + 16d^6 - 4d \cdot x_2^2x_7 = x_5(2d - x_2)^2$$

при $d > 0, x_2 - 2d > 0$.

Параметр b розраховують так:

$$b = x_2 - 2d, \quad (2.53)$$

глибини z_1 і z_2 - шляхом розв'язку такої системи рівнянь:

$$\begin{cases} d(z_1^2 + z_2^2 + b^2) + z_1^2 \cdot b + 3d^2b + 2d^3 = x_7, \\ z_1^2 + z_2^2 + b^2 + 6 \cdot d \cdot b + 6 \cdot d^2 = x_6, \\ z_1 > 0, \\ z_2 > 0, \end{cases} \quad (2.54)$$

а струми I_1 і I_2 - шляхом розв'язку такої системи:

$$\begin{cases} I_1 z_1 + I_2 z_2 = x_1, \\ dI_1 \cdot z_1 + dI_2 z_2 + bI_1 z_1 = x_3. \end{cases} \quad (2.55)$$

Аналогічним чином можна отримати і розв'язати систему нормальних рівнянь на базі результатів спостережень вертикальної складової напруженості магнітного поля.

Перевірку роботи запропонованого способу також було здійснено шляхом числового моделювання. Текст програми для числового моделювання вказаної методики для двох трубопроводів приведений в додатку Ж. В якості початкових даних згенеровано випадковим чином значення параметрів I_1 , I_2 , z_1 , z_2 , b . За початковими даними обчислювалися профілі горизонтальної складової напруженості магнітного поля. Похибка, яка додавалася до профілів, мала рівномірний закон розподілу та випадкове зміщення.

Результати виконаного числового моделювання приведені в табл. 2.5.

Таблиця 2.5.

Результати числового моделювання використання методики умовно-нормальних рівнянь для двох трубопроводів

Вихідні дані					Пох. H_y , %	Обчислені дані				Відносна похибка, %			
I_1 , А	z_1 , м	I_2 , А	z_2 , м	b , м		I_1 , А	z_1 , м	I_2 , А	z_2 , м	I_1	z_1	I_2	z_2
0,17	2,01	0,59	2,82	2,65	0	0,17	2,01	0,59	2,82	0	0	0	0
0,29	2,84	0,9	1,31	3,89	0	0,29	2,84	0,9	1,31	0	0	0	0
0,67	2,98	0,67	2,32	0,76	0	0,67	2,98	0,67	2,32	0	0	0	0
0,58	2,82	0,97	0,7	1,37	1	0,58	2,82	0,97	0,7	0,2	0,2	0,1	0,1
0,87	1,38	0,41	0,7	0,78	1	0,87	1,38	0,41	0,69	0,9	0	0,8	0,7
0,45	1,47	0,57	1,05	0,96	1	0,45	1,46	0,57	1,04	1,1	0,4	0,2	0,9
0,74	0,68	0,31	2,91	2,16	2	0,75	0,68	0,32	2,93	1,3	0,5	2,4	0,7
0,32	1,69	0,77	0,81	2,77	2	0,32	1,68	0,78	0,81	0,3	0,7	0,4	0,3
0,13	2,79	0,07	1,74	0,54	2	0,12	2,75	0,06	1,78	3,9	1,6	1,9	2,1
0,96	1,89	0,22	3,2	1,12	3	0,93	1,9	0,21	3,32	2,3	0,4	1,9	3,8
0,38	1,52	0,28	0,81	3,56	3	0,38	1,52	0,29	0,82	0,2	0,1	0,7	0,4
0,11	2,89	0,12	2,57	0,87	5	0,12	2,89	0,12	2,66	5,5	0,2	1,2	3,4
0,91	1,41	0,97	3,46	1,11	5	0,88	1,48	0,97	3,6	3,1	4,9	0,3	3,9
0,59	1,34	0,23	1,44	3,89	5	0,59	1,32	0,24	1,4	0,9	1,6	5,2	3,3
Максимальна похибка										5,5	4,9	5,2	3,9

Використання надлишкових даних в результаті профілювання і методика умовно-нормальних рівнянь дозволяє точніше визначати струм в стінках підземних трубопроводів. Для двох трубопроводів похибка є більшою, ніж для одного трубопроводу, хоча при наявності завади меншої 3% відносна похибка визначення інформативних параметрів буде меншою 4%. Використання даної методики для трьох і більше трубопроводів є недоцільним, оскільки суттєво ускладнюється розв'язок і необхідна значно більша кількість даних профілю напруженості магнітного поля.

Аналогічним чином можна використовувати спосіб з використанням методики умовно-нормальних рівнянь і для вертикальної складової напруженості магнітного поля.

2.6. Вимоги до системи безконтактного визначення струмів в стінках підземних трубопроводів

Для реалізації запропонованого в п.2.3. способу дискретизації профілю напруженості магнітного поля над підземними трубопроводами необхідно використовувати три горизонтальні антени, розміщені на певній заданій віддалі одна від одної. Під час проведення вимірювань необхідно орієнтувати систему таких антен паралельно землі і розміщувати її в площині, перпендикулярній до осі трубопроводу.

Спосіб безконтактного визначення струму, запропонований в п. 2.2. реалізується за допомогою двох блоків магнітних, в яких міститься п'ять магнітних антен. Для двох і більше паралельних підземних трубопроводів, використовуючи запропонований спосіб, можливим є визначення тільки кута бази магнітних антен системи до осей цих трубопроводів.

Для забезпечення більшої точності необхідно передбачити в системі використання декількох частот, в тому числі й низьких.

Система безконтактного визначення струмів в стінках підземних трубопроводів, яка реалізує наведені в даному розділі способи повинна задовільняти таким вимогам [64, 65]:

- здійснювати безконтактне визначення струмів у стінках підземних трубопроводів на відстані до 1500 м по обидві сторони від місця підключення генератора та на глибині залягання трубопроводів до 3 м;

- мати можливість отримувати результати відповідних параметрів в умовах наявності промислових завод;

- забезпечувати циклічне зчитування значень напруженості магнітного поля із всіх магнітних антен системи з проміжком часу між зчитуваннями не більше 250 мс;

- забезпечувати можливість автоматичного визначення профілю горизонтальної складової напруженості магнітного поля над трубопроводами та на його основі обчислювати значення струмів в їх стінках і інші параметри залягання трубопроводів;

- повинна включати систему позиціонування GPS для отримання можливості запам'ятовування знаходження місць пошкодження ізоляційного покриття контрольованих підземних трубопроводів;

- мати можливість зберігати розраховані дані в енергонезалежній пам'яті;

- забезпечувати тривалість роботи від одного комплекту заряджених акумуляторів до 4-х годин;

- забезпечувати можливість зміни частоти генератора системи;

- здійснювати контроль за переміщенням блоків магнітних антен на стабільній висоті та не допускати відхилення їх положення від вертикальної осі;

- здійснювати автоматичне визначення місць погіршеної ізоляції підземних трубопроводів згідно із відповідною методикою з виведенням інформації про це оператору у вигляді звукової і світлової сигналізації в процесі контролю.

Система безконтактного визначення струмів в стінках підземних трубопроводів повинна складатися із генератора змінного струму і приймача із блоками магнітних антен.

Вхідні каскади приймача повинні мати реалізовані засоби захисту від завад промислової частоти. Особливу увагу слід звернути на фільтрування сигналу від частоти 100 Гц, що створюється станціями катодного захисту. Даний сигнал має високу інтенсивність і може значно впливати на результати контролю.

Приймач повинен містити швидкодіючі комутатори для забезпечення зчитування даних із системи магнітних антен.

Для реалізації запропонованих методик необхідно забезпечувати достатню обчислювальну потужність.

Оскільки безконтактне визначення струмів у стінках підземних трубопроводів може виконуватися у важких кліматичних умовах, то система повинна мати волого- та пилезахищене виконання.

Висновки до розділу

Згідно із проведеними дослідженнями та на основі поданого в другому розділі матеріалу можна зробити такі висновки:

а) запропоновано і теоретично обґрунтовано спосіб визначення струму в стінці одного підземного трубопроводу з використанням п'яти магнітних антен в двох блоках на основі однократно вимірюваної напруженості магнітного поля цими антенами в зоні пролягання трубопроводу без необхідності орієнтації бази системи антен в перпендикулярній до осі трубопроводу площині, що дозволяє зменшити кількість магнітних антен в порівнянні з аналогами;

б) розроблено удосконалений спосіб автоматичного отримання дискретизованого профілю горизонтальної складової напруженості магнітного поля над підземними трубопроводами шляхом проходження із системою контролю, що має в своєму складі три розміщені горизонтально магнітні

антени, через осі підземних трубопроводів по поверхні землі в перпендикулярному напрямку до осей трубопроводів, що дозволяє зменшити тривалість процесу отримання профілю;

в) розроблено структури штучних нейронних мереж, які дозволяють безконтактно визначати струми в стінках одного та двох підземних трубопроводів шляхом опрацювання числових значень профілів напруженостей магнітного поля. В обох випадках це тришаровий персептрон. Для одного трубопроводу кількість нейронів: 25, 15, 3, для двох трубопроводів: 25, 15, 6. Такі структури штучних нейронних мереж дозволяють підвищити точність визначення струмів в стінках підземних трубопроводів;

г) розроблено методику умовно-нормальних рівнянь безконтактного визначення струмів в стінках одного і двох підземних трубопроводів на основі дискретизованих профілів напруженостей магнітного поля над підземними трубопроводами при переході із системою магнітних антен над ними в перпендикулярному напрямку, що дає можливість підвищувати точність визначення струмів і зменшувати тривалість процесу визначення струмів;

д) на основі аналізу розроблених способів і методик показано, що для обробки профілю горизонтальної складової напруженості магнітного поля одного трубопроводу з метою безконтактного визначення струму в його стінках доцільно використовувати методику умовно-нормальних рівнянь, а для безконтактного визначення струмів у стінках двох підземних трубопроводів – штучні нейронні мережі;

ж) розроблені вимоги до інформаційно-вимірювальної системи безконтактного визначення струмів в стінках підземних трубопроводів, які, разом із всіма запропонованими способами безконтактного визначення струмів і автоматичного отримання дискретизованого профілю напруженості магнітного поля над трубопроводами, повинні бути враховані при подальшому її розробленні.

РОЗДІЛ 3

УДОСКОНАЛЕНА СИСТЕМА ВИЗНАЧЕННЯ СТРУМІВ У СТІНКАХ ПІДЗЕМНИХ ТРУБОПРОВОДІВ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ЇХ ІЗОЛЯЦІЙНОГО ПОКРИТТЯ

В процесі розроблення удосконаленої системи безконтактного визначення струмів у стінках підземних трубопроводів з метою контролю стану їх ізоляційного покриття, яка б реалізовувала запропоновані в розділі 2 способи, може виникнути ряд труднощів, пов'язаних із умовами контролю. Одною із основних проблем є наявність магнітного поля, створеного станціями катодного захисту (СКЗ). Сила струму, створеного СКЗ, набагато більша від сили струму, який може створити генератор вимірювальної системи в стінках контрольованих підземних трубопроводах. В процесі контролю стану ізоляційного покриття можна було б використовувати і струм від СКЗ, але при цьому може бути недостатньою точність визначення цих струмів в стінках трубопроводів.

На результати контролю можуть також впливати блукаючі струми. При наявності ліній електропередач магнітне поле від них може також спотворювати магнітне поле навколо трубопроводу [66-67].

Тому, враховуючи вказані умови контролю, для наведення магнітного поля рекомендується використовувати зовнішній генератор, який слід під'єднувати до контрольованого трубопроводу. Недоліком при цьому є відносно мала відстань (до 1,5-2 км. в обидві сторони від точки під'єднання генератора), на якій можна здійснювати процес контролю. Особливо протяжність контролю зменшується за наявності значних пошкоджень ізоляційного покриття, через які відбувається значне зникання струму. За межами таких місць струм у стінках трубопроводу може бути недостатнім для проведення процесу контролю.

Перевагою використання окремого генератора є також створення магнітного поля, частота якого не буде рівною чи кратною промисловій частоті, що дозволить підвищити точність та вірогідність контролю.

Отже розроблювана система безконтактного визначення струмів у стінках підземних трубопроводів повинна складатися із генератора та приймача. В процесі проектування приймального пристрою особливу увагу необхідно звернути на завадозахищеність вхідних контурів і забезпечення значної швидкодії системи.

При розроблені системи контролю необхідно також врахувати всі вимоги, які приведені в п. 2.6.

3.1. Структурна схема удосконаленої системи визначення струмів у стінках підземних трубопроводів

Для реалізації запропонованих в розділі 2 способів було розроблено структурні схеми приймача (рис. 3.1) та генератора (рис. 3.2) [68].

Для забезпечення можливості отримання профілю горизонтальної складової напруженості магнітного поля над підземними трубопроводами способом, який описано в п. 2.3, передбачається використання трьох горизонтально розміщених магнітних антен. На структурній схемі рис. 3.1 це антени *МА1*, *МА4*, *МА6*.

Додатково для визначення кута між підземним трубопроводом і системою магнітних антен системи використовується магнітна антена *МА2*. Для миттєвого визначення інформативних параметрів в процесі безконтактного визначення струмів в стінках підземних трубопроводів (п. 2.2) необхідно використовувати вихідні дані вимірювальних каналів із п'ятьма магнітними антенами, які розміщені в двох блоках. Це магнітні антени *МА1-МА5*.

Для реалізації всіх способів, запропонованих у розділі 2, в структурній схемі передбачено розміщення семи магнітних антен в трьох блоках: *МА1-МА3*

в першому блоці; *МА4*, *МА5* та *МА6*, *МА7* відповідно в другому та третьому блоках магнітних антен.

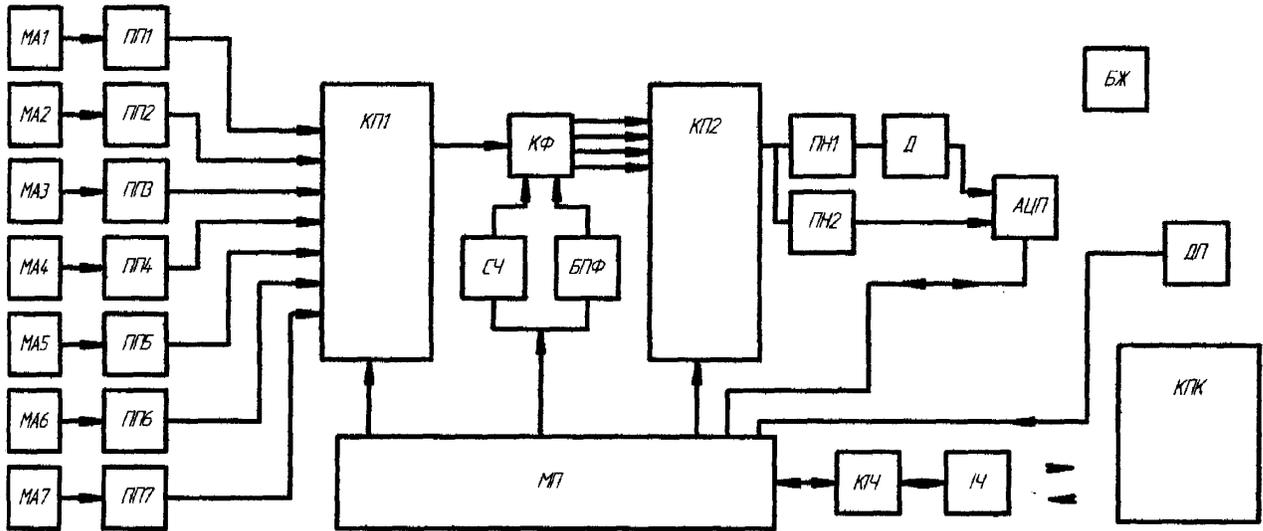


Рис. 3.1. Структурна схема приймача системи для безконтактного визначення струмів у стінках підземних трубопроводів:

МА1-МА7 – магнітні антени; *ПП1-ПП7* – попередні підсилювачі; *КП1-КП2* – керовані підсилювачі; *КФ* – керований фільтр; *СЧ* – синтезатор частоти; *БПФ* – блок програмування фільтру; *ПН1-ПН2* – повторювачі напруги; *Д* – детектор; *АЦП* – аналого-цифровий перетворювач; *МП* – мікроконтролер; *КЧ* – стек протоколів інфрачервоного порту; *ІЧ* – інфрачервоний порт; *КПК* – кишеньковий комп’ютер; *ДП* – детектор переміщення; *БЖ* – блок живлення

Підсилення сигналу, отриманого від магнітних антен здійснюється попередніми підсилювачами *ПП1-ПП2*. Підсилений сигнал поступає на керований підсилювач *КП1*, який дозволяє вибрати один із семи каналів і встановлювати коефіцієнт підсилення сигналу, який достатній для подальшої обробки. Керування підсилювачем *КП1* здійснюється за допомогою мікроконтролера *МП*. Вибраний сигнал поступає на керований фільтр *КФ*. Характеристики фільтра задаються мікроконтролером *МП* за допомогою синтезатора частоти *СЧ* та блоку програмування фільтру *БПФ*. Робота фільтра базується на схемі перемикачів із заданою частотою конденсаторів. Тому важливою умовою є точність і стабільність синтезатора частоти, від чого буде

залежати якість фільтрування корисного сигналу. Блок програмування фільтра перетворює команди мікроконтролера в команди програмування фільтра. За допомогою керованого фільтра можна реалізувати різну будову фільтра сигналу. В нашому випадку використовується смуговий фільтр. Програмований фільтр має чотири виходи, які відповідають реалізації фільтрів 2-го, 4-го, 6-го та 8-го порядків.

Відфільтрований сигнал одночасно по чотирьох каналах поступає на керований підсилювач *КП2*. За командою мікроконтролера вибирається один із чотирьох сигналів, який, за необхідності, підсилюється. Це дозволяє використовувати за необхідності різні порядки фільтра.

Вихідний сигнал із програмованого підсилювача подається на два повторювачі напруги *ПН1*, *ПН2*. До виходу одного із повторювачів напруги під'єднаний детектор змінного сигналу *Д*.

Для перетворення аналогового сигналу у цифрову форму використовується двоканальний аналого-цифровий перетворювач (*АЦП*). На один вхід даного *АЦП* поступає продетектований сигнал, а на другий вхід – змінний сигнал.

Зчитані дані з *АЦП* передаються на мікроконтролер.

Для оброблення вимірних даних напруженості магнітного поля різними магнітними антенами та контролю над процесом вимірювання використовується портативний комп'ютер *КПК*. Це дозволяє не обмежуватися в кількості пам'яті та обчислювальних ресурсах для алгоритмів оброблення. Передача даних між мікроконтролером і *КПК* відбувається через інфрачервоний порт. Для цього реалізовано прийомо-передавач для інфрачервоного протоколу *ІЧ* та стек протоколів інфрачервоного порту *КІЧ*. Використання стеку протоколів дає можливість встановлювати з'єднання за допомогою різноманітних протоколів і зробити процес з'єднання універсальним.

За допомогою інфрачервоного з'єднання *КПК* передає команди управління на мікроконтролер, а він, в свою чергу, створює і передає команди

управління на керовані підсилювачі, фільтр, АЦП.

Процес вимірювання за допомогою приймача полягає в почерговому отриманні інформаційного сигналу з кожної із магнітних антен. Для цього мікроконтролер почергово передає команди на керований підсилювач *КП1* з інформацією про підсилення та номер каналу, який буде оброблятися. Далі сигнал фільтрується за допомогою наперед запрограмованого мікроконтролером фільтру та через *КП2*, *ПН1-ПН2*, *Д* потрапляє на АЦП, звідки і подається на мікроконтролер. Після читання всіх семи значень напруг їх оцифровані дані передаються на портативний комп'ютер.

Використання *КПК* дозволяє окрім підвищення функціональності приймача реалізувати систему позиціонування GPS.

Для забезпечення стабільного живлення приймача використовується блок живлення *БЖ*.

Важливою умовою отримання профілю напруженості магнітного поля є необхідність при проходженні над віссю трубопроводу дотримуватися однієї висоти та не відхилятися від площини, перпендикулярної до осі трубопроводу, а також витримувати весь час строго вертикальне положення всіх блоків магнітних антен системи. Для цього використовується детектор переміщення *ДП*, який включає інклінометр та акселерометр, дані з яких передаються на мікроконтролер *МП*.

Однією із переваг запропонованої схеми є можливість реалізації в ній певних обчислювальних алгоритмів, які записуються в пам'ять портативного комп'ютера *КПК*. Також зручним є сенсорне управління та можливість розробки інтуїтивно зрозумілого інтерфейсу програмного забезпечення. Користувач має можливість досить тонко налаштувати процес вимірювання струмів в стінках контрольованих підземних трубопроводів.

Основними вимогами, які ставляться до генератора, є стабільність його вихідних характеристик, можливість налаштування довільної частоти вихідного струму і значна потужність вихідного сигналу.

Розроблена структурна схема генератора (рис. 3.2) являє собою

потужний імпульсний генератор із цифровим управлінням.

Генерування сигналу необхідної частоти та шпаруватості відбувається в блоці генерації *БГ*. Даний блок разом із вихідним трансформатором *ВТ* формує імпульси необхідної конфігурації, які можна подавати на контрольований трубопровід. Для узгодження рівня сигналу із електричним опором трубопроводу передбачений блок комутації *КБ*. Це дає можливість отримувати необхідний рівень струму в трубопроводах із різним електричним опором ізоляційного покриття. Для контролю за параметрами вихідного сигналу в конструкції генератора передбачені датчик напруги *ДН* та датчик струму *ДС*. Сигнали із таких датчиків можуть бути використані для стабілізації вихідних параметрів генератора.

Управління роботою генератора відбувається за допомогою мікроконтролерного блоку управління *БУ*, який передає параметри сигналу, який повинен бути генерований, і команду на початок/зупинку генерації в блок генерації. Крім цього блок *БУ* управляє блоком комутації.

Користувач має змогу керувати роботою генератора за допомогою клавіатури *К*. Індикація режимів роботи генератора відбувається на індикаторі *ІНД*.

Запам'ятовуючий пристрій *ЗП* використовується для зберігання поточних налаштувань генератора, а також для наперед заданих програм роботи генератора.

Для запобігання змін вихідних даних за рахунок розряджання акумуляторної батареї блок управління перевіряє напругу на батареї.

Дані із датчиків струму та напруги також поступають на блок управління, яким відбувається підлаштування роботи генератора.

3.2. Блоки і вузли удосконаленої системи визначення струмів у стінках підземних трубопроводів

На основі розроблених структурних схем приймача і генератора системи

безконтактного визначення струмів у стінках підземних трубопроводів були розроблені принципові електричні схеми і на їх основі виготовлено приймач 1 та генератор 2 системи КІ-1 (рис. 3.3).

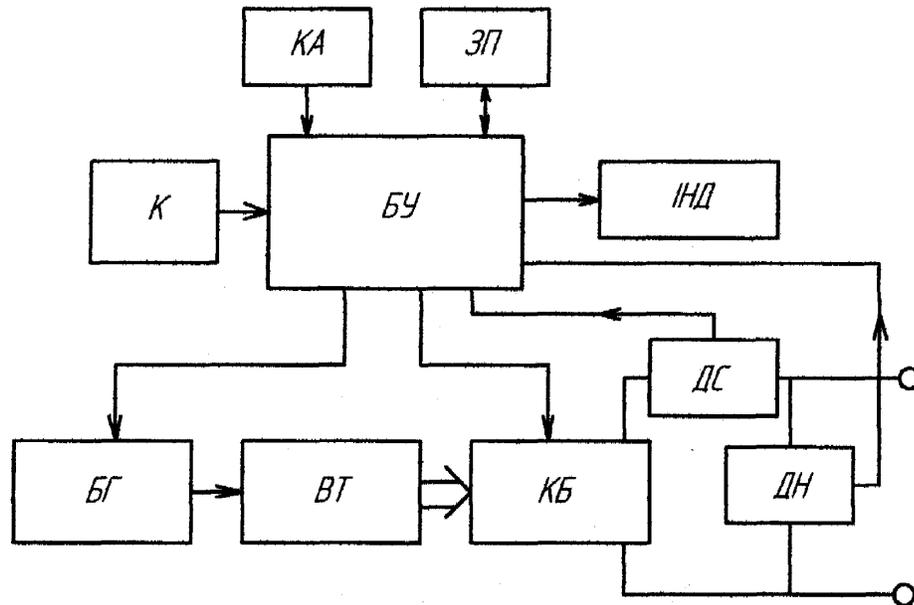


Рис. 3.2. Структурна схема генератора системи для контролю стану ізоляційного покриття підземних нафтогазопроводів:

БГ – блок генерації; БУ – блок управління; ВТ – вихідний трансформатор; ДН – давач напруги; ДС – давач струму; ЗП – запам'ятовуючий пристрій; КБ – блок комутації; К – блок кнопок; КА – блок контролю стану акумулятора; ІНД – індикатор

3.2.1. Характерні особливості конструкції і електричних схем генератора сигналів КІ-1-Г системи КІ-1

Зовнішній вигляд генератора КІ-1-Г системи КІ-1 приведено на рис 3.4.

Вигляд окремих блоків генератора КІ-1-Г системи КІ-1 показаний на рис. 3.5. Основними складовими є силовий блок 1, блок управління 2, силовий трансформатор 3, плати клавіатури 4, символічного індикатора 5 та акумуляторної батареї 6.

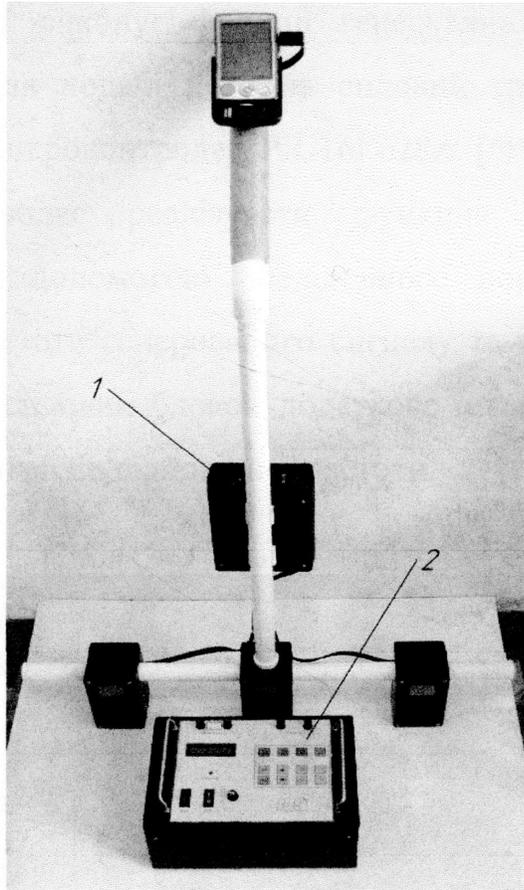


Рис. 3.3. Система безконтактного визначення струмів в стінках підземних трубопроводів КІ-1:

1 – приймач сигналів КІ-1-П; 2 – генератор сигналів КІ-1-Г

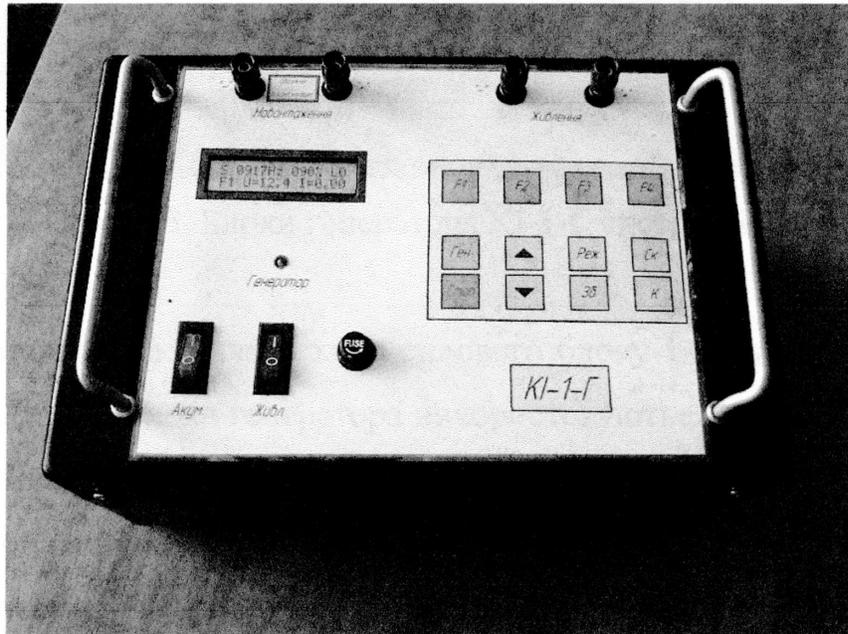


Рис. 3.4. Генератор збудження струмів КІ-1-Г системи КІ-1

Силовий блок 1 виконує функції генерування імпульсного сигналу прямокутної форми для подачі його на силовий трансформатор. Функцію генерування виконує мікроконтролер PIC16F628A [69]. Використання такого мікроконтролера дозволяє реалізувати функцію задавання параметрів вихідного сигналу за допомогою послідовного порту. На силовий блок подається значення частоти генерованого сигналу та шпаруватості імпульсів. Також для управління силовим блоком додатково подаються команди початку та зупинки генерації сигналів відповідної частоти.

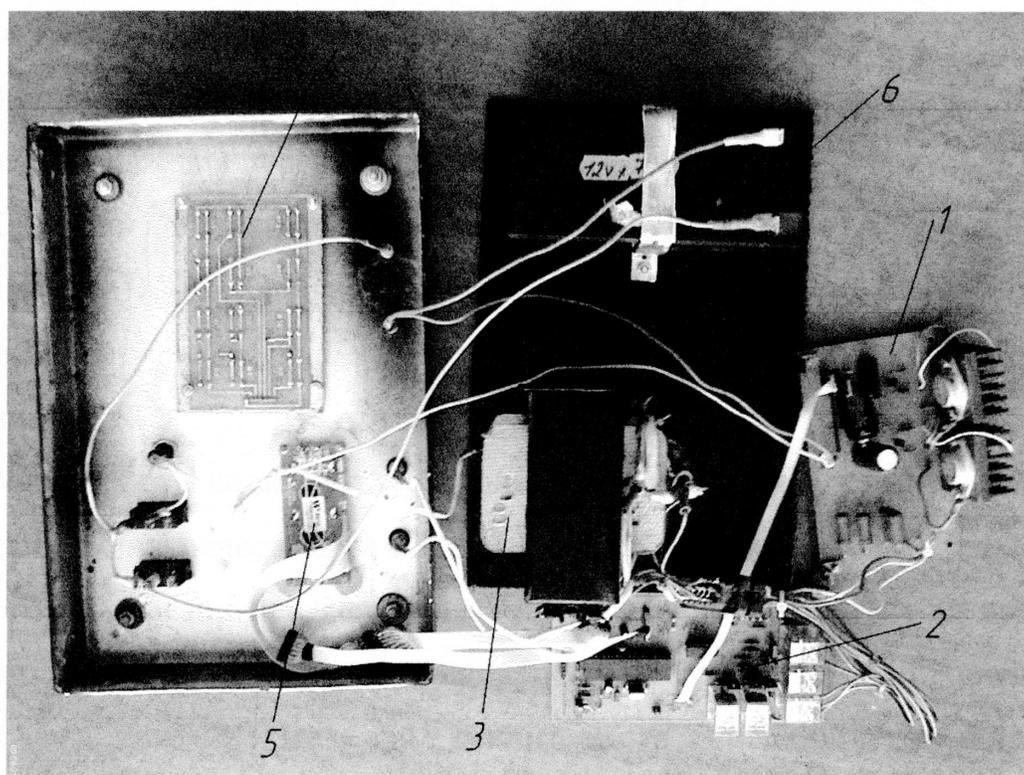


Рис. 3.5. Блоки генератора КІ-1-Г системи КІ-1

Принципова електрична схема силового блоку 1 приведена в додатку З. У силових каскадах блока генератора використовуються транзистори КТ825А. Їх використання дозволяє пропускати через первинну обмотку силового трансформатора струм до 20А.

Принципова електрична схема блоку управління 2 приведена в додатку И. Опрацювання сигналів та подання команд виконує

мікроконтролер PIC16F877A. Такий мікроконтролер містить в своєму складі сім каналів аналого-цифрового перетворювача, що значно спрощує отримання сигналів від давачів.

Використання п'яти вторинних обмоток силового трансформатора 3 дозволяє при їх комбінуванні отримувати на виході напруги від 10 до 160 В. Це дає змогу виконувати узгодження виходу генератора із навантаженням.

Узгодження виходу генератора із електричним опором ізоляційного покриття підземних трубопроводів відбувається шляхом комутування виходів силового трансформатора. Для цього використовуються реле RL1-RL5 та ключі, які реалізовані на транзисторах Q1-Q5.

Вбудований в контролер PIC16F877A модуль послідовного порту використовується для передачі сигналів управління силовим модулем.

Контроль напруги акумулятора відбувається шляхом визначення напруги на подільнику R4-R5. Опорною напругою при цьому є напруга стабілізатора – 5В. Для калібрування процесу визначення напруги генератора призначений подільник R1-R2.

Визначення сили струму, що подається на стінку підземного трубопроводу, визначається за спадом напруги на послідовно під'єднаному до вихідного кола резисторі R8. Отриманий сигнал підсилюється за допомогою диференціального підсилювача, виконаного на одній із секцій операційного підсилювача LM324. Ще дві секції цього операційного підсилювача використовуються для детектування і отримання абсолютного значення сигналу, за яким визначається величина струму, що протікає в підземному трубопроводі.

Інформація про роботу генератора виводиться на символний рідкокристалічний індикатор, зовнішній вигляд якого показаний на рис. 3.6.

На індикаторі відображається інформація про частоту генерації, шпаруватість сигналу, канал узгодження з ізоляційним покриттям трубопроводу, номер комірки збереженого налаштування, напругу акумулятора та струм, який протікає в колі навантаження.

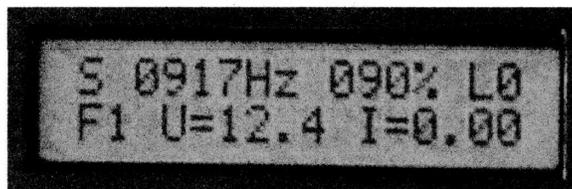


Рис. 3.6. Індикатор генератора КІ-1-Г розробленої системи КІ-1

Для зберігання налаштованих параметрів передбачено чотири комірки пам'яті. Зберігання відбувається при натисканні кнопки «Зб» клавіатури 4 генератора, зовнішній вигляд якої показаний на рис 3.4.

3.2.2. Розроблення електричних схем і конструкції блока приймача КІ-1-П системи КІ-1

Будова приймача КІ-1-П системи КІ-1 безконтактного визначення струмів в стінках підземних трубопроводів приведена на рис 3.7.

Основними складовими приймача є три блоки магнітних антен 1 із попередніми підсилювачами, які розміщені на відстані 25см один від одного, блок 2 підсилення, фільтрування і передачі сигналів, портативний комп'ютер 3, основа приймача 4.

Як зазначалося раніше однією із основних проблем забезпечення стабільної роботи розробленої системи є використання добротних приймальних каскадів. В якості приймальних антен використовувалися котушки, які були намотані на гранях куба із стороною 7 см. Використання меншого каркасу для котушок викликає труднощі, оскільки при однаковій кількості витків декількох приймальних антен, намотаних на одному каркасі за рахунок певної товщини кожної із намоток, їх характеристики можуть суттєво відрізнятися. Котушки містять по 1000 витків мідного проводу $\varnothing 0,1$ мм. Один із трьох блоків магнітних антен містить три котушки, які намотані на трьох взаємно перпендикулярних каркасах (для сприймання трьох компонент магнітного поля). Два інші блоки містять по дві взаємно перпендикулярні

катушки. Для антен використано електростатичне екранування, що дає змогу зменшити вплив зовнішніх завад.

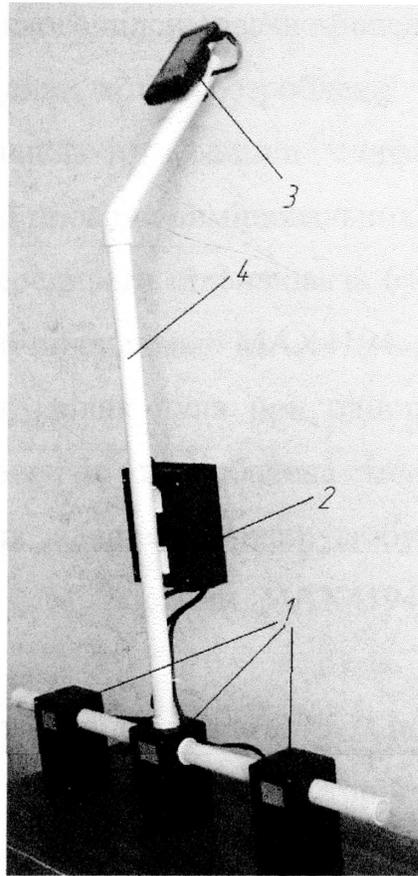
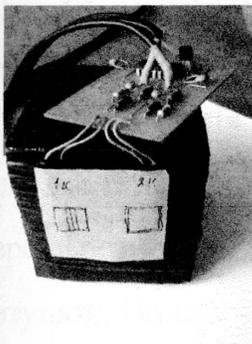


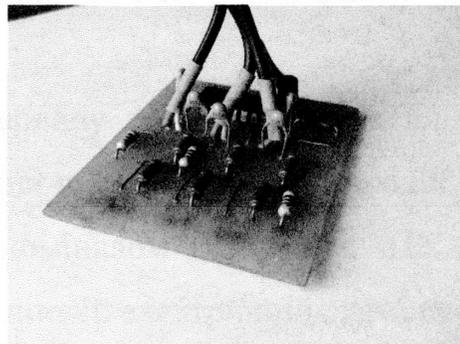
Рис. 3.7. Приймач системи КІ-1:

1 – блок магнітних антен; 2 – приймач сигналів; 3 – КПК; 4 – основа

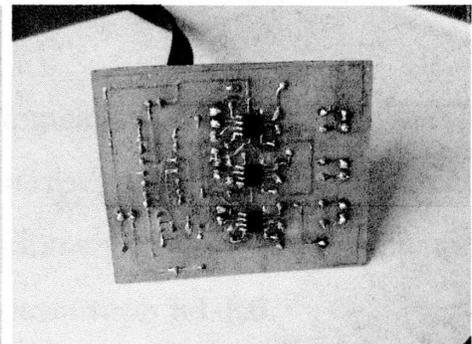
Загальний вигляд блоку магнітних антен із платою попереднього підсилювача приведений на рис. 3.8, а.



а)



б)



в)

Рис. 3.8. Магнітні антени та попередні підсилювачі приймача розробленої системи КІ-1

Вигляд плати попереднього підсилювача із сторони елементів та сторони монтажу зображено відповідно на рис. 3.8, б та рис. 3.8, в. Принципова електрична схема попереднього підсилювача приведена в додатку К.

Використання у вхідних колах розробленої системи інструментальних підсилювачів дозволяє виключити вплив синфазних завад, які можуть наводитися на з'єднувальні проводи вимірювальних котушок [70-71].

При розробленні попереднього підсилювача були використані малошумні прецизійні інструментальні підсилювачі MAX4194. Для забезпечення зміщення змінного сигналу відносно рівня нуля при однополярному живленні таких інструментальних підсилювачів передбачена можливість задання опорної напруги зміщення [72]. Для задання цієї напруги було використано прецизійне джерело напруги LM4040. Мікросхеми MAX4194 мають відносну похибку підсилення 0,01%.

Задання коефіцієнта підсилення G попереднього підсилювача (додаток Л) здійснюється за допомогою резисторів R10-R12 та визначається із залежності:

$$G = 1 + \frac{50000}{R}, \quad (3.1)$$

де R - опір резисторів R10-R12.

Для забезпечення необхідного рівня вихідного сигналу необхідно виконати підсилення вихідної напруги магнітних антен в 1000 раз. Згідно з (3.1) значення опорів R10-R12 складають 49,9 Ом (для ряду номіналів з похибкою 1%).

Мінімізація впливу температури на вимірювальні антени відбувається шляхом підключення виводів антен до входів інструментальних підсилювачів через резистори номіналом 100 кОм. Це збільшує опір вимірювальних котушок. На принциповій електричній схемі це резистори R1-R6.

Для комутування сигналів антен та додаткового підсилення сигналу були використані програмовані підсилювачі MCP6S28. Управління роботою таких інтегральних схем відбувається за допомогою інтерфейсу SPI. Згідно з [69] такі

програмовані підсилювачі дозволяють вибрати один із восьми вхідних каналів і підсилювати його на величину з ряду: 1, 2, 4, 5, 8, 10, 16, 32.

Використання програмованого підсилювача MCP6S28 дає змогу виконувати зміну каналу та коефіцієнта підсилення за час менший 1,5 мс. Перед проведенням вимірювань програмований підсилювач U1 програмується на певний наперед заданий коефіцієнт підсилення. В процесі вимірювань по інтерфейсу SPI поступають команди вибору вимірювального каналу. Час приходу команд визначається із заданої частоти сигналу генератора і складає 5-6 періодів цього сигналу.

В умовах промислових завод отримання інформаційного сигналу можливе тільки при використанні смугових фільтрів. Використання пасивних фільтрів не дозволяє проводити якісне фільтрування вимірювального сигналу. Окрім цього пасивні фільтри складні у виготовленні і налаштуванні.

Використання активних смугових фільтрів оправдане для одної робочої частоти. Використання декількох частот потребує виготовлення і налагоджування відповідної кількості активних фільтрів, що ускладнює конструкцію приймача [73, 74].

Згідно з [44] забезпечення необхідного рівня фільтрування можливе при використанні фільтрів 8 – го порядку.

Для приймача системи безконтактного визначення струмів в стінках підземних трубопроводів оптимальним є використання фільтрів із конденсаторами, що перемикаються. Будова таких фільтрів дозволяє виконувати їх у вигляді інтегральних схем.

В якості фільтра на конденсаторах, що перемикаються, було вибрано фільтр MAX261. Це реалізовані в одному корпусі два фільтри другого порядку, однією із можливих реалізацій яких є смугові фільтри. На одній інтегральній схемі MAX261 може бути реалізований фільтр 4 – го порядку [75].

Фільтр, який був розроблений для приймача, складається із двох мікросхем MAX261 (U2 та U3). Всі фільтри другого порядку з'єднані послідовно. Кожен із виходів фільтрів також під'єднаний до входів

комутованого підсилювача U6. Така реалізація дозволяє при програмуванні каналу цього підсилювача використовувати відповідно фільтр 2-го, 4-го, 6-го або 8-го порядків.

Перевагою використання вказаних фільтрів є можливість їх програмування за заданими характеристиками. Робота фільтрів можлива за наявності стабільного тактового сигналу. Для таких цілей використовується мікроконтролер PIC16F628 (U1). По інтерфейсу UART на нього подаються числові значення частоти та добротності фільтрів. Контролер в свою чергу формує тактові імпульси та команди програмування фільтрів. Стабільність і точність тактових імпульсів забезпечується за рахунок використання модуля широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Для роботи була вибрана частота $f_{clk}=118800$ Гц. Індикатором роботи системи фільтрування є світлодіод D1.

Вказаний програмований фільтр (рис. 3.9) дозволяє задавати чотири режими роботи (M1-M4). Оптимальними режимами роботи для приймача є режими роботи M1, M2.

В режимі роботи M1 центральна частота f_0 та добротність смугового фільтра Q визначаються із залежностей [75]:

$$f_0 = \frac{2f_{clk}}{\pi(64 + N_f)}, \quad (3.2)$$

$$Q = \frac{64}{(128 - N_Q)}, \quad (3.3)$$

де N_f - змінна програмування частоти ($N_f=0\div 63$),

N_Q - змінна програмування добротності ($N_Q=0\div 127$).

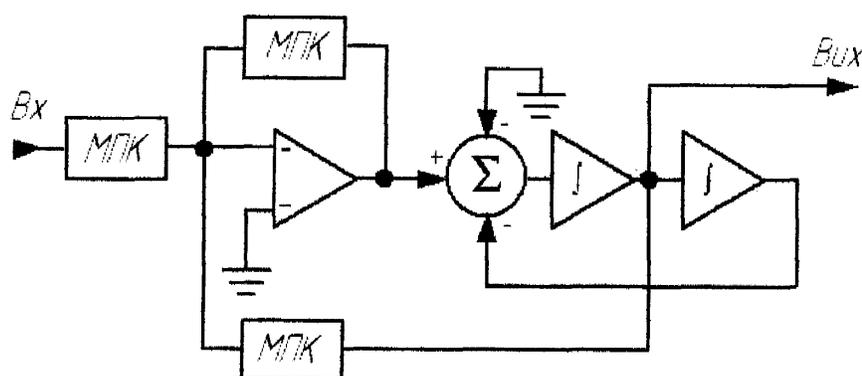
Коефіцієнт підсилення фільтра H_{M1} буде рівний $-Q$.

Для режиму роботи M2 залежності для f_0 та Q будуть такими:

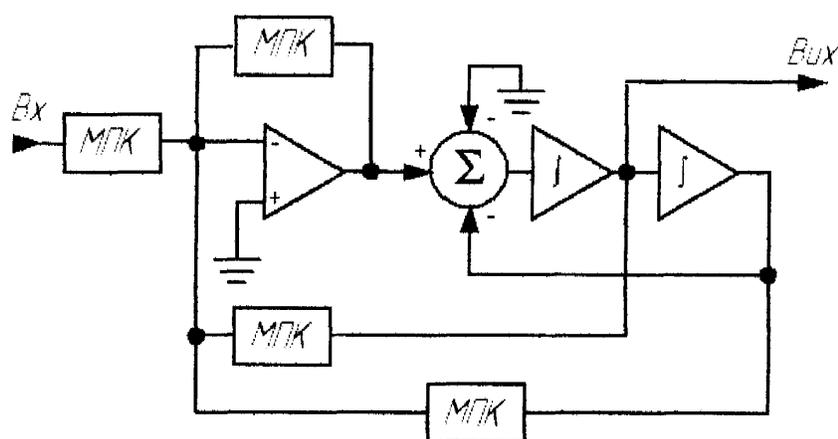
$$f_0 = \frac{2^{\frac{3}{2}} f_{clk}}{\pi(64 + N_f)}, \quad (3.4)$$

$$Q = \frac{64\sqrt{2}}{(128 - N_Q)}. \quad (3.5)$$

Коефіцієнт підсилення H_{M2} буде рівний $-Q/\sqrt{2}$.



а)



б)

Рис. 3.9. Конфігурація програмованого смугового фільтра в режимі роботи M1 (а) та M2 (б):

МПК – матриця конденсаторів, що перемикаються

Тоді ширина смуги пропускання фільтра буде такою:

$$B_2 = \frac{f_o}{Q}. \quad (3.6)$$

Залежності (3.2) - (3.6) приведені для фільтра 2-го порядку. Для спрощення розрахунків при розробленні фільтрів вищих порядків виконувалося каскадування ідентичних фільтрів 2-го порядку.

Смуга пропускання для фільтрів 4-го, 6-го та 8-го порядків відповідно буде такою:

$$B_4 = 0,644B_2, \quad (3.7)$$

$$B_6 = 0,51B_2, \quad (3.8)$$

$$B_8 = 0,435B_2. \quad (3.9)$$

Добротність фільтрів відповідних порядків буде рівною:

$$Q_4 = 1,55Q, \quad (3.10)$$

$$Q_6 = 1,96Q, \quad (3.11)$$

$$Q_8 = 2,30Q. \quad (3.12)$$

Відфільтрований сигнал з вибраного входу керованого підсилювача U6 за необхідності підсилюється і передається на вхід 12-бітного аналого-цифрового перетворювача МСР3202. Точність показів АЦП досягається за рахунок високоточного джерела опорної напруги 4,096 В МСР1541. Отриманий за допомогою АЦП двійковий код при цьому буде рівний величині напруги на вході перетворювача в мілівольтах.

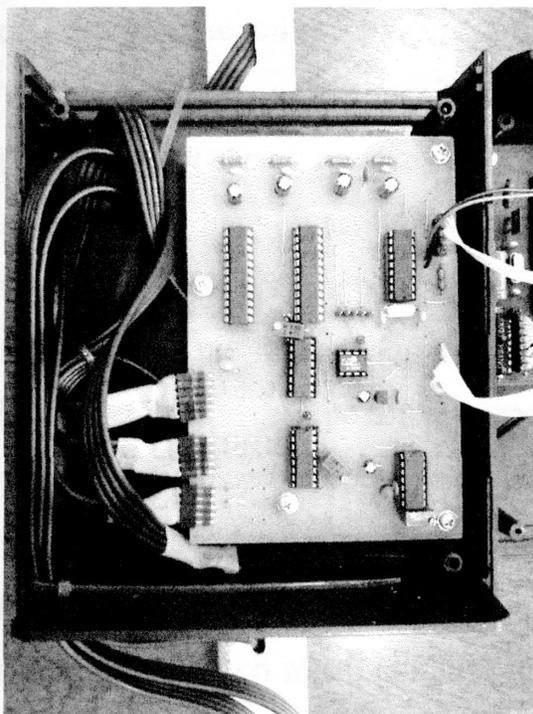
Для опрацювання команд і управління роботою схем приймача використовується мікроконтролерний блок, принципова електрична схема якого приведена в додатку М. Безпроводне з'єднання із КПК відбувається через інфрачервоний порт, який під'єднується до роз'єму J4. Сигнали проходять через

мікросхему MCP2150, яка містить стек протоколів інфрачервоного зв'язку. Мікроконтролер PIC16F877A обмінюється інформацією вже із вказаною мікросхемою, що виключає необхідність додатково програмно реалізувати стек протоколів інфрачервоного з'єднання.

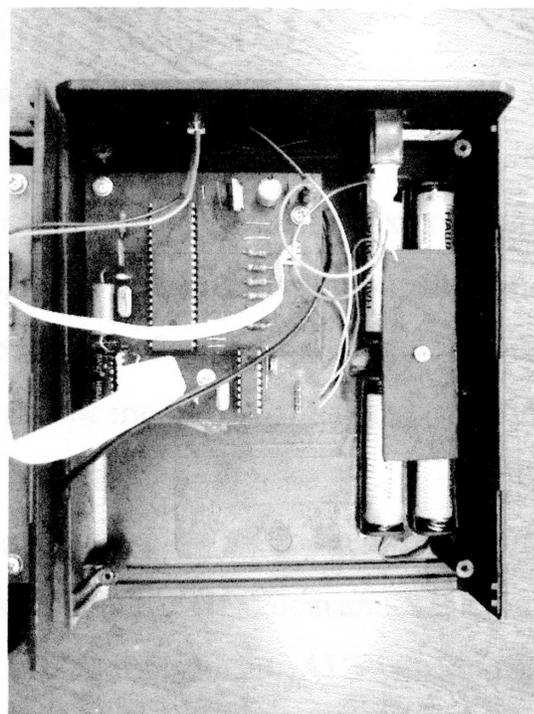
Контролер PIC16F877A для забезпечення максимальної швидкості роботи працює на частоті 20МГц.

Компонування плати комутації і фільтрування та плати мікропроцесорного блоку зображено на рис. 3.10. Для збільшення заводозахисту плати комутування та підсилення (рис. 3.10, а) використовується електростатичне екранування (на рис. 3.10 зображено із знятим екраном).

Згідно з розробленими принциповими схемами мінімальне підсилення приймача КІ-1-П складає 1000. Максимальне підсилення буде рівне добутку підсилення керованих підсилювачів, програмованих фільтрів та попередніх підсилювачів і складе не менше 10^6 . Проміжок часу, за який відбувається отримання числових значень із усіх семи антен, буде не більше 100 мс.



а)



б)

Рис. 3.10. Плати блоку комутації і фільтрування (а) та мікроконтролерного блоку (б) приймача КІ-1-П системи КІ-1

Розроблені принципові схеми дозволяють виконувати вимірювання напруг із семи магнітних антен, за якими можна отримати сім значень напруженостей магнітного поля. Запропоновані рішення забезпечують поставлені в п. 2.6. вимоги до системи безконтактного визначення струму.

3.3. Особливості розроблення програмного забезпечення системи КІ-1

Розроблення програмного забезпечення системи безконтактного визначення струмів в стінках підземних трубопроводів передбачало розроблення програмного коду для мікроконтролерів генератора (в силовому блоці та блоці керування), програмного коду мікроконтролерів приймача (мікроконтролер програмування фільтрів та керований мікроконтролер) та програми для КПК.

Написання програмного коду для мікроконтролерів відбувалося на мові С з використанням компілятора фірми CCS [76, 77].

Програми для контролерів генератора приведені в додатку Н, а для контролерів приймача в додатку П.

Особливу увагу було приділено оптимізації програмного коду приймача по швидкодії. Оскільки передача по інфрачервоному порту забирає порівняно багато часу, то величини вимірних напруг кожної із семи котушок послідовно зберігалися в пам'яті мікроконтролера і тільки після того, як були отримані всі напруги, відбувалася їх передача на КПК.

Швидкість вимірювань збільшилася при виключенні процедури детектування амплітуди інформативного сигналу. Це досягалося за рахунок швидкого циклічного вимірювання напруги з допомогою АЦП на протязі 2-3 періодів сигналу генератора (близько 46 значень за період). По різниці мінімуму та максимуму отриманих значень визначалася амплітуда корисного сигналу. Це дозволило усунути вплив перехідних процесів, які виникали на детекторі при перемиканні каналів.

Підвищення точності вимірювання напруг відбувалося шляхом усереднення декількох послідовних виконаних вимірювань із однієї антени. Кількість вимірювань для усереднення задається програмно.

При розробленні програмного забезпечення генератора враховувалася необхідність калібрування розробленого давача струму та давача напруги живлення акумуляторної батареї. Крім цього, було реалізовано функції зберігання параметрів генератора.

Програмне забезпечення для портативного комп'ютера з метою реалізації всіх методик визначення струмів у трубопроводах було розроблено на платформі .Net Compact Framework 2.0 на мові програмування C# в середовищі Microsoft Visual Studio 2008 [78, 79].

Інтерфейс програмного забезпечення показаний на рис. 3.11. В програмі передбачено використання методик визначення інформативних параметрів як для одного трубопроводу, так і для двох трубопроводів.

Для зручності навігації по програмі доступ до елементів керування в розробленій системі здійснюється за допомогою вкладок (рис. 3.11).

Перша вкладка програми (рис. 3.11, а) дозволяє по залежностях, приведених в п. 2.2, миттєво визначати струм в стінці підземного трубопроводу, глибину його залягання, відстань від точки розміщення приймача до проекції осі трубопроводу на поверхні землі та кут між віссю та вимірювальною системою. Виміряні дані зберігаються у вигляді текстового файлу в постійній пам'яті портативного комп'ютера.

Наступна вкладка (рис. 3.11, б) реалізує алгоритм отримання профілю напруженості магнітного поля, на основі якого в подальшому працюють способи, описані в п. 2.5 - 2.6. Для введення інформації про точку вимірювання передбачене поле редагування. Для контролю за процесом вимірювань реалізований графічний індикатор. Результати вимірювань напруженості магнітного поля виводяться в текстовому полі.

Для всіх запропонованих способів визначення струму у стінках підземних трубопроводів реалізована система позиціонування GPS. У виміряні

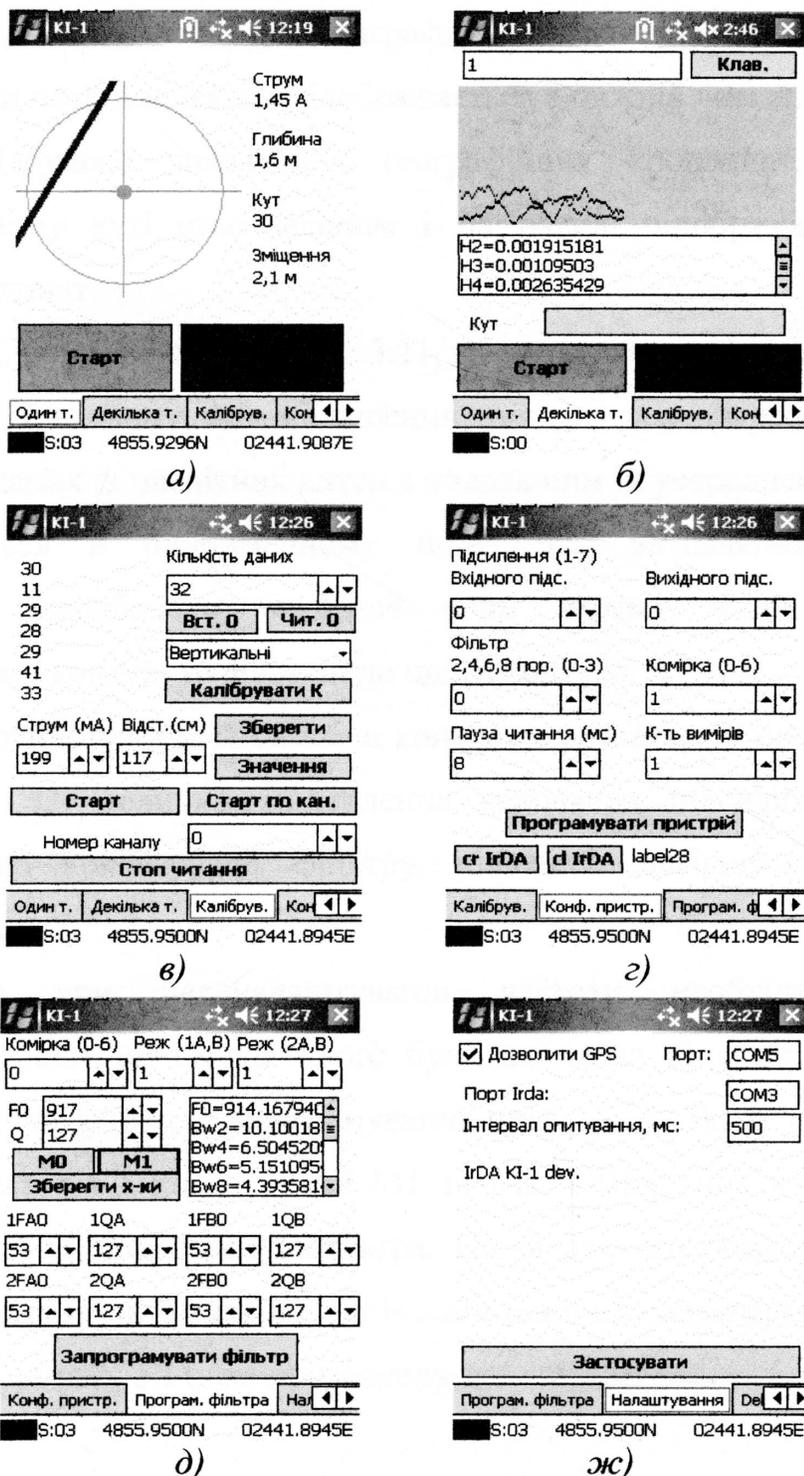


Рис. 3.11. Інтерфейс програмного забезпечення для портативного комп'ютера:

- а) вкладка програми, що реалізує миттєве визначення струму в одному трубопроводі; б) вкладка програми, що реалізує профілювання та визначення струмів згідно п.2.4-2.5; в) вкладка програми, що реалізує калібрування приймача KI-1-П; г) вкладка програми, що реалізує налаштування конфігурації приймача KI-1-П; д) вкладка програми, що реалізує програмування фільтра; ж) вкладка програми, що реалізує налаштування програмного забезпечення

дані додається інформація про географічні координати точок вимірювань. Робота системи позиціонування відображається в нижній частині екрану.

Коли відбулося визначення географічних координат, індикатор в нижньому лівому куті стає зеленим і на панелі відображаються числові значення координат.

Вкладка, зображена на рис. 3.11, *в*, дозволяє виконувати процедуру калібрування. При цьому, для збільшення точності передбачено багатократне вимірювання даних із магнітних антен з подальшим їх усередненням. Кількість даних задається в однойменному полі. Для визначення коефіцієнтів калібрування передбачено введення сили струму, який протікає по калібрувальному контурі та відстані до цього контура.

Конфігурація приймача системи контролю задається у наступній вкладці (рис. 3.11, *г*). Це величина підсилення керованих підсилювачів, порядок фільтру, номер конфігурації фільтру, кількість вимірювань, що будуть усереднюватися.

Оскільки при переналаштуванні частоти необхідно змінювати конфігурацію фільтрів, то для цього була написана підпрограма, яка може розраховувати коефіцієнти програмування (рис. 3.11, *д*). В ній реалізовано розрахунок фільтрів в конфігурації M1 та M2. Розрахунок відбувається при заданні частоти та добротності фільтра. Після вдалого розрахунку отримані параметри можна завантажити в одну із семи комірок конфігурації приймача.

Вкладка на рис. 3.11, *ж* призначена для налаштування роботи програми КПК.

3.4. Методика проведення безконтактних вимірювань напруженостей магнітного поля над підземними трубопроводами розробленою системою

Методика проведення безконтактного визначення струмів в стінках підземних трубопроводів системою КІ-1 передбачає такі етапи: підготовку до контролю, отримання профілів напруженості магнітного поля за алгоритмом,

приведеним в п. 2.3, опрацювання профілів згідно описаних в п. 2.4 - 2.5 способів та визначення місць пошкодження ізоляційного покриття підземних трубопроводів.

Підготовка до контролю включає під'єднання генератора до контрольованого трубопроводу, встановлення та під'єднання виносного заземлювача. Після ввімкнення генератора необхідно вибрати робочу частоту та виконати його узгодження із трубопроводом. При виконанні узгодження встановлюється оптимальний струм в стінках підземного трубопроводу (250-3000 мА).

Вимірювання за допомогою приймача КІ-1-П слід починати на відстані, не меншій 10 м від місця під'єднання генератора. Перед початком вимірювань в приймачі вибирають робочу частоту, конфігурацію фільтрувальних каскадів, рівень підсилення.

Для отримання даних за методикою, описаною в п. 2.2, достатньо розмістити приймач вимірювальної системи в місці проходження підземного трубопроводу і натиснути кнопку «Старт» (рис. 3.11, а). При цьому на графічному індикатору буде відобразитися розміщення підземного трубопроводу і одночасно будуть виводитися числові покази розрахованих параметрів.

Отримання профілю (профілювання) горизонтальної складової напруженості магнітного поля відбувається за технологією, зображеною на рис. 3.12. Для цього оператор розміщає приймач системи із однієї сторони контрольованих одного чи двох трубопроводів. Це легко зробити, оскільки дані із магнітних антен відображаються на графічному індикаторі, а максимуми сигналу будуть свідчити про розміщення антен над віссю трубопроводів. Далі повертанням приймача досягають його перпендикулярності до осей підземних трубопроводів. Для цього орієнтуються за найменшими показами індикатора «Кут» (рис. 3.11, б).

Отримання профілю відбувається шляхом перенесення приймача КІ-1-П зорієнтованої системи з одної сторони відносно осі одного чи двох підземних

трубопроводів на іншу. Одночасно оператор слідкує за показами індикатора «Кут» для забезпечення перпендикулярності руху системи. Аналізуючи дані про кут приймача та покази акселерометра, система відкидає дані, які були визначені невірно. Також відбувається сигналізація про відхилення від траєкторії проходження і відхилення осі блоків магнітних антен від вертикальної осі. Після закінчення процедури проходження приймач КІ-1-П розраховує профіль горизонтальної складової напруженості магнітного поля та струм в стінках підземних трубопроводів згідно описаних вище (п. 2.3-2.6) способів. Одночасно відбувається розрахунок коефіцієнта заникання $k_{зан}$ струму вздовж траси підземних трубопроводів.

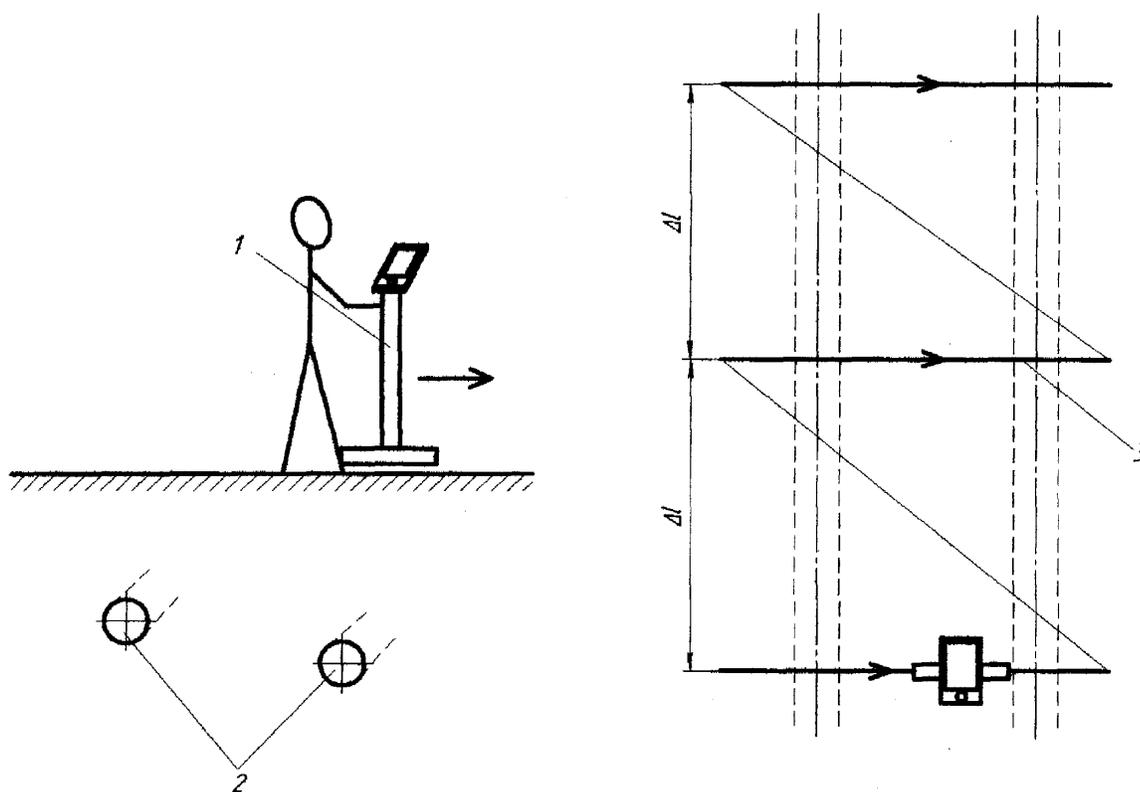


Рис. 3.12. Технологія безконтактного визначення струмів в стінках підземних трубопроводів:

1 – приймач КІ-1-П системи КІ-1; 2 – підземні трубопроводи; 3 – маршрут руху оператора

Процедура проходження оператором із системою над підземними трубопроводами повторюється через заданий крок контролю Δl (рис. 3.12). В результаті оператором буде отримано набір інформативних параметрів. За визначеною силою струму здійснюється побудова графіка зникання струму вздовж контрольованих трубопроводів з прив'язкою до даних GPS.

3.5. Опрацювання отриманих результатів вимірювань системою KI-1

Опрацювання результатів вимірювання розробленою системою KI-1 відбувається автоматично після кожного отримання профілю напруженості магнітного поля. За допомогою приведених в розділі 2 методик визначають такі основні інформативні параметри: значення струму в стінках трубопроводів, глибини їх залягання і віддалі між ними.

Оцінку якості ізоляційного покриття можна проводити за величиною коефіцієнту затухання струму $k_{зан}$ (мБ/м) (1.20).

Згідно з [4] в багатьох випадках зручніше використовувати відносну величину витрати струму на ділянці трубопроводу:

$$\delta I_n = \frac{2(I_{n+1} - I_n)}{\Delta l(I_{n+1} + I_n)}. \quad (3.13)$$

На основі визначених струмів в стінках підземних трубопроводів можна обчислити значення перехідного опору $R_{пер}$ між металом труби і ґрунтом між двома сусідніми вимірюваннями вздовж траси трубопроводів [4]:

$$R_{пер} = \frac{U_{ex}}{I_{ex}} \frac{\pi D \Delta l}{\ln\left(\frac{I_n}{I_{n+1}}\right)}, \quad (3.14)$$

де U_{ex} - напруга в точці під'єднання генератора,

I_{ex} - струм в точці під'єднання генератора,

D - діаметр трубопроводу.

Стан ізоляційного покриття підземних трубопроводів оцінюють за величиною перехідного опору (див. табл. 1.3).

Критерій оцінки стану ізоляційного покриття за величиною коефіцієнта затухання струму (залежність (1.20)) залежить від діаметра трубопроводу, частоти струму, параметрів ґрунту [4]. Згідно з [26] в табл. 3.1 приведена залежність якості ізоляційного покриття підземного трубопроводу від величини коефіцієнта затухання в ньому струму з частотою 1000 Гц.

Таблиця 3.1

Залежність якості ізоляції підземного трубопроводу від величини заникання в ньому струму з частотою 1000 Гц [26]

Якість ізоляції	Коефіцієнт затухання струму $k_{зан}$ для діаметру трубопроводу, мБ/м				
	325 мм	530 мм	920 мм	1220 мм	1420 мм
Відмінна	<0,235	<0,52	<1,4	<2,5	<3,5
Добра	0,235-0,42	0,52-0,81	1,4-2,2	2,5-3,8	3,5-6,6
Задовільна	0,42-0,7	0,81-1,35	2,2-3,8	3,8-6,6	6,6-9,4
Погана	0,7-1,9	1,35-3,7	3,8-10,5	6,6-19,5	9,4-25
Дуже погана	1,9-18	3,7-35	10,5-100	19,5-180	25-200

На основі величини заникання струму на певному проміжку підземного трубопроводу можна оцінити якість його ізоляційного покриття між двома точками контролю.

Висновки до розділу

В процесі розроблення удосконаленої системи безконтактного

визначення струмів у стінках підземних трубопроводів було виконано наступне:

а) розроблено структурну схему удосконаленої системи КІ-1 безконтактного контролю стану ізоляційного покриття підземних трубопроводів, яка включає генератор та приймач. В розробленій структурній схемі приймача КІ-1-П основними блоками є блоки магнітних антен, комутації, фільтрування та мікроконтролерний блок. Опрацювання даних відбувається в портативному комп'ютері КПК. Особливу увагу при розробленні було приділено блоку фільтрування. При розробленні структурної схеми генератора КІ-1-Г враховувалася необхідність зміни частоти генерації та вимірювання параметрів вихідного сигналу;

б) розроблено принципові електричні схеми генератора та приймача, які забезпечують реалізацію запропонованих структурних схем. Розроблене схемотехнічне рішення приймача дозволяє підсилувати сигнал від 1000 до $1 \cdot 10^6$ раз і зчитувати дані із магнітних антен за час, не більше 100 мс. Можливе використання однієї із чотирьох конфігурацій фільтрів: 2-го, 4-го, 6-го, 8-го порядку;

в) розроблене програмне забезпечення для мікроконтролерів приймача та генератора, а також програмне забезпечення для портативного комп'ютера КПК системи КІ-1;

г) приведені характерні особливості технології проведення безконтактного визначення струмів у стінках підземних трубопроводів розробленою системою КІ-1, описано процес опрацювання даних на основі отриманих результатів за допомогою розробленого на мові С# програмного забезпечення.

РОЗДІЛ 4

МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ РОЗРОБЛЕНОЇ СИСТЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ СТРУМІВ В СТІНКАХ ПІДЗЕМНИХ ТРУБОПРОВОДІВ

4.1. Аналіз факторів впливу на точність результатів визначення струмів у стінках підземних трубопроводів

Аналізуючи описані запропоновані в розділі 2 способи безконтактного визначення струму для ізоляційного покриття підземних трубопроводів, структурну схему розробленої системи контролю, яка призначена для реалізації цих способів (рис. 3.1), а також її окремі блоки і вузли (п. 3.3) і методику проведення системою процесу контролю (п. 3.4), можна відмітити, що основними похибками, які впливають на точність отримуваних результатів визначення вказаних струмів є такі:

- методичні похибки, які пов'язані із вибором конкретних способів визначення струмів;
- інструментальні похибки, які обумовлені похибками конкретних блоків системи КІ-1 для вимірювання напруженості магнітного поля над контрольованими трубопроводами і подальшого розрахунку струму чи струмів в стінках трубопроводів згідно вибраних способів.

Як було вказано в розділі 2, за допомогою запропонованої системи КІ-1 можуть бути реалізовані три способи визначення значень струмів у стінках підземних трубопроводів:

1-ий спосіб визначення струму у стінці тільки одного підземного трубопроводу за допомогою системи КІ-1 з розміщенням блоку 5-ти магнітних антен системи без його точної орієнтації по відношенню до осі трубопроводу і одноразовим вимірюванням цими магнітними антенами напруженості магнітного поля;

2-ий спосіб, який передбачає проходження оператором із розробленою системою KI-1 в перпендикулярному напрямку по поверхні землі з однієї сторони відносно осі контрольованих підземних трубопроводів на іншу, вимірювання напруженості магнітного поля при цьому (профілювання) і використання розробленої ШНМ для визначення струмів в стінках трубопроводів в точці переходу через трубопроводи (п. 2.4);

3-ій спосіб, який передбачає проходження оператором із розробленою системою KI-1 в перпендикулярному напрямку по поверхні землі з однієї сторони відносно осі контрольованих підземних трубопроводів на іншу, вимірювання напруженості магнітного поля (профілювання) і використання надлишкової інформації для отримання умовних рівнянь, подальшим переходом від них до нормальних рівнянь і їх розв'язком за допомогою КПК системи з метою визначення струмів у стінках трубопроводів в точці переходу через трубопроводи (п. 2.5).

Основним фактором, який впливає на методичну похибку 1-ого способу є відповідність залежності (2.33) залежності (2.3).

Так як залежність (2.33) була отримана з урахуванням схеми розміщення блоків антен системи відносно контрольованого трубопроводу (рис. 2.1) і описаних вище рівнянь (2.9) – (2.32) без всяких припущень, нехтувань тощо, а також строгості залежності (2.3), то можна вважати, що методична похибка при використанні 1-го способу відсутня.

Основним фактором, який впливатиме на методичну похибку 2-го способу визначення струмів у стінках підземних трубопроводів є похибка тренування розробленої нейронної мережі (рис. 2.10).

Основними факторами, які впливають на методичну похибку 3-го способу визначення струмів в стінках одного чи двох підземних трубопроводів є похибка методики одержання необхідної кількості нормальних рівнянь на базі значно більшої кількості умовних рівнянь, похибка методики отримання лінійних умовних рівнянь на базі нелінійного рівняння (2.42), похибка методики подальшого визначення середніх квадратичних відхилень (СКВ)

параметрів I , z і d для одного трубопроводу на основі отриманих значень СКВ проміжних параметрів x_1 , x_2 і x_3 в результаті розв'язку системи нормальних рівнянь (2.46) і параметрів I_1 , I_2 , z_1 , z_2 , b і d на основі отриманих значень СКВ проміжних параметрів $x_1 \div x_7$ в результаті розв'язку системи нормальних рівнянь (2.51).

Основними факторами, які впливають на інструментальну похибку визначення струму I у стінках одного підземного трубопроводу розробленою системою при використанні 1-го способу є похибки каналів вимірювання напруженості магнітного поля з використанням магнітних антен $MA1 \div MA5$ і інших блоків розробленої системи (рис. 3.1), а також значення вказаних напруженостей.

При використанні 2-го способу визначення струмів у стінках одного чи двох трубопроводів основними факторами, які впливають на інструментальну похибку при цьому є похибки каналів вимірювання і перетворення напруженості магнітного поля в електричні напруги з використанням магнітних антен $MA1$, $MA2$, $MA4$ і $MA6$, значення цих напруженостей, а також значення відстані між блоками магнітних антен Δu і її похибка в розробленій системі контролю.

При використанні 3-го способу визначення струмів в стінках одного чи двох трубопроводів основними факторами, які впливають на інструментальну похибку при цьому також є такі, які мають місце при використанні 2-го способу визначення струмів у стінках одного чи двох трубопроводів.

Крім цього, одним із факторів, який впливатиме на сумарну похибку всіх трьох способів є наявність систематичних похибок в результатах попереднього визначення коефіцієнтів перетворення (калібрування) вимірювальних каналів системи КІ-1. З метою їх усунення необхідно після їх виявлення і визначення виключити їх із результатів спостережень шляхом введення відповідних поправок в отримані результати спостережень.

В табл. 4.1 приведені узагальнено основні фактори, які впливають на сумарну похибку визначення струмів у стінках підземних трубопроводів розробленою системою KI-1 при використанні трьох способів безконтактного визначення струмів у стінках підземних трубопроводів.

4.2. Методичні, інструментальні і сумарна похибки розробленої системи KI-1 безконтактного визначення струмів у стінках підземних трубопроводів

4.2.1. Методичні похибки системи KI-1

Так як залежність (2.33) була отримана з урахуванням схеми розміщення блоків антен системи відносно контрольованого трубопроводу (рис. 2.1) і описаних вище рівнянь (2.9) – (2.32) без всяких припущень, нехтувань тощо, а також строгості залежності (2.3), то можна вважати, що методична похибка при використанні 1-го способу відсутня [80, 81].

Основним фактором, який впливатиме на методичну похибку 2-го способу визначення струмів у стінках підземних трубопроводів є похибка тренування розробленої нейронної мережі (рис. 2.10).

Згідно аналізу результатів процесу тренування нейронної мережі на базі 2000 випадкових даних вхідних параметрів слід вважати, що відносна похибка тренування ШНМ є для безконтактного визначення струму з її допомогою одного підземного трубопроводу становить $5 \cdot 10^{-7}$ (рис. 2.12) при кількості циклів тренування 565, а відносна похибка є тренування ШНМ для безконтактного визначення струму з її допомогою у стінках двох підземних трубопроводів становить $5 \cdot 10^{-7}$ при кількості циклів тренування 1851. Очевидно, що із збільшенням кількості випадкових даних вхідних параметрів для тренування ШНМ похибка тренування буде зменшуватися. Однак це суттєво збільшує час тренування. Для 2000 таких вхідних даних час тренування становив 10 хв., для тренування ШНМ для визначення струмів у стінках двох

підземних трубопроводах при 2000 вхідних даних для тренування з $\epsilon = 5 \cdot 10^{-7}$ час тренування становив 31 хв., кількість циклів становила 1851.

Таблиця 4.1

Фактори, які впливають на сумарну похибку визначення струмів у стінках підземних трубопроводів розробленою системою KI-1 трьома способами

Спосіб контролю	Методична похибка в результаті:	Інструментальні похибки в результаті:
Вимірювання напруженостей магнітного поля 5-ма каналами системи в одній точці над трубопроводом* (1-ий спосіб)	одержання залежності струму від вимірюваних параметрів згідно (2.38)	задання віддалі між блоками антен системи і її похибка; похибок вимірювання напруженостей магнітного поля з використанням магнітних антен MA1÷MA5 і інших блоків системи; значень вимірюваних напруженостей
Використання нейромережі з вимірюванням напруженості магнітного поля 4-ма каналами системи і отриманням даних профілю $H_{y_i} = f(y_i)$ (2-ий спосіб)	тренування нейромережі системи	калібрування каналів вимірювання напруженостей в системі з використанням магнітних антен MA1, MA2, MA4 і MA6; значень вимірюваних напруг на виходах каналів; віддалі між блоками магнітних антен Δy і її похибки
Використання умовних рівнянь на основі вимірювань напруженості магнітного поля 4-ма каналами системи з отриманням даних профілю $H_{y_i} = f(y_i)$ і переходом до нормальних рівнянь і їх розв'язку (3-ій спосіб)	розв'язку системи нормальних рівнянь, отриманих на основі умовних рівнянь	похибки вимірювання напруженості магнітного поля з використанням магнітних антен MA1, MA2, MA4 і MA6 і інших блоків системи; значень вимірюваних напруженостей; віддалі між блоками магнітних антен Δy і її похибки

* Дана методика придатна тільки для визначення струму у стінках одного підземного трубопроводу розробленою системою KI-1.

Методична похибка розв'язку системи нормальних рівнянь, отриманих на основі умовних рівнянь залежить від вибраної методики і засобів для розв'язку цих рівнянь [61].

Як видно із (2.46) і (2.51) при визначенні струму у стінках одного чи двох підземних трубопроводах 3-ім способом кількість умовних рівнянь залежить від довжини віддалі L між 1-ою і останньою точками контролю при переході в перпендикулярному напрямку трубопроводів над ними і віддалю між блоками магнітних антен розробленої системи Δy , яка може задаватись оператором і для одного трубопроводу може становити, наприклад, 0,25м, для двох трубопроводів, наприклад, 0,5м. Наприклад, при $L=5\text{м}$ і $\Delta y=0,25\text{м}$ для одного трубопроводу кількість точок контролю n і відповідно кількість умовних рівнянь буде становити 21, а при $L=15\text{м}$ і $\Delta y=0,5\text{м}$ для двох паралельних трубопроводів кількість точок контролю n і умовних рівнянь буде становити 31.

Кількість нормальних рівнянь, які будуть отримані для цих двох випадків будуть відповідно 3 і 7 згідно (2.46) і (2.51).

Похибка отримання нормальних рівнянь на базі значно більшої кількості умовних рівнянь практично відсутня при використанні відповідних засобів обчислювальної техніки, програмного середовища і розробленого спеціального програмного забезпечення (в розробленій системі контролю використовується кишеньковий персональний комп'ютер (КПК) з такими характеристиками: частота процесора – 416 МГц, оперативна пам'ять – 64 МБ, флеш пам'ять, програмне середовище Maple).

Розв'язок системи 3-х чи 7-ми отриманих нормальних рівнянь можна здійснювати методом визначників, похибка отриманих при цьому значень $x_1 \div x_3$ і $x_1 \div x_7$ буде залежати від технічних можливостей КПК і відповідного програмного забезпечення.

Тому, враховуючи технічні характеристики КПК, строгість методики отримання нормальних рівнянь на базі умовних рівнянь, наявність готових

програм для розв'язку системи лінійних рівнянь (наприклад метод визначників), можна вважати, що методична похибка 3-го способу визначення струмів у стінках підземних трубопроводів також дорівнює нулю.

4.2.2. Інструментальні похибки системи КІ-1

Абсолютне значення інструментальної похибки $\Delta_{I \text{ instr.1}}$ при безконтактному визначенні струму I в стінці одного підземного трубопроводу згідно 1-го способу можна визначити диференціальним методом, розглядаючи таке визначення I як опосередковане вимірювання з одноразовими спостереженнями відповідних аргументів згідно (2.33), тобто [82-84]:

$$\Delta_{I \text{ instr.1}} = \sum_{j=1}^q \frac{\partial I}{\partial c_j} \Delta c_j, \quad (4.1)$$

де q – кількість змінних аргументів c_j ($q=6$), що входять в праву частину (2.38);

Δc_j – абсолютні похибки цих аргументів c_j .

Змінними аргументами c_j в даному випадку будуть результати вимірювання напруженості магнітного поля відповідними каналами системи з використанням 5-ти магнітних антен $MA1 \div MA5$ і інших блоків системи КІ-1, а також віддаль $b = \Delta y$ між блоками магнітних антен.

Калібрування всіх вимірювальних каналів системи КІ-1 з магнітними антенами $MA1 \div MA7$, тобто визначення коефіцієнтів перетворення вимірюваної напруженості магнітного поля у напругу здійснювалося на експериментальній установці (рис. 4.1), в якій амплітуда змінного струму з частотою 868 Гц в алюмінієвому провіднику становила 250 мА з похибкою ± 1 мА, віддаль центрів всіх магнітних антен, осі яких під час калібрування були дотичними до кола в площині, перпендикулярній до осі провідника, до центра провідника із

струмом становила $0,700\text{м}$ з похибкою $\pm 5\text{мм}$. В результаті такого калібрування були визначені такі коефіцієнти перетворення (калібрування) каналів системи КІ-1 з використанням антен $МА1 \div МА7$: $K_{МА1} = 5,11\text{В/Тл}$; $K_{МА2} = 5,05\text{В/Тл}$; $K_{МА3} = 5,01\text{В/Тл}$; $K_{МА4} = 5,08\text{В/Тл}$; $K_{МА5} = 4,95\text{В/Тл}$; $K_{МА6} = 5,03\text{В/Тл}$; $K_{МА7} = 4,97\text{В/Тл}$ з однаковими похибками перетворення $\Delta K = \pm 0,05\text{В/Тл}$. Причому магнітна індукція B в точці центрів магнітних антен під час калібрування становила $0,7146\text{Тл}$, а змінні напруги на виходах каналів були такими: $U_{МА1} = 3,65\text{В}$; $U_{МА2} = 3,64\text{В}$; $U_{МА3} = 3,58\text{В}$; $U_{МА4} = 3,63\text{В}$; $U_{МА5} = 3,69\text{В}$; $U_{МА6} = 3,59\text{В}$; $U_{МА7} = 3,55\text{В}$, значення яких були визначені з абсолютними похибками $\Delta U = \pm 0,01\text{В}$. Віддаль $b = \Delta y = 0,250 \pm 0,001\text{м}$.

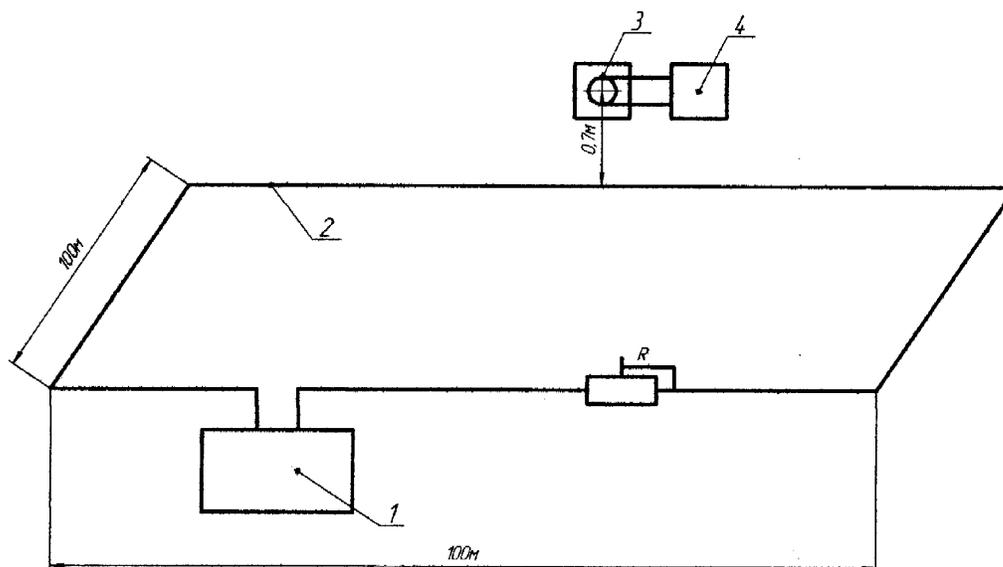


Рис. 4.1. Установка для калібрування каналів вимірювання напруженості розробленої системи КІ-1:

1 – генератор; 2 – алюмінієвий дріт діаметром 4 мм, розміщений на ізоляторах на висоті 200 мм; 3 – відповідний блок магнітних антен; 4 – вторинний блок розробленої системи

З урахуванням вказаних значень складових правої частини (4.1) похибка $\Delta I_{instr.1}$ 1-го способу контролю, яка була порахована на основі (4.1) в програмному середовищі Maple 13 згідно програми, яка приведена в додатку Р

становить 11,13 мА при струмі $I=250$ мА. Звідси відносна похибка $\delta_{I_{instr.1}}=4,45\%$.

Для інших значень вимірюваної напруженості магнітного поля каналами системи КІ-1 з магнітними антенами $MA1 \div MA5$ значення I і $\Delta_{I_{instr.1}}$ можуть бути розрахованими аналогічно з урахуванням вказаних вище коефіцієнтів перетворення вимірювальних каналів системи з магнітними антенами, значень $b = \Delta y$, $\Delta b = 0,001$ м.

Значення струму у стінці одного трубопроводу при його визначенні за допомогою 2-го способу (з використанням натренованої ШНМ) розраховується за допомогою такої залежності:

$$I = \frac{2\pi}{z} H_{y_i} (z^2 + (y_i - d)^2), \quad (4.2)$$

де $y_i = y_{i-1} + \Delta y$; $i = 1 \div n$;

i – рівновіддалені точки, в яких здійснюється вимірювання горизонтальної складової напруженості магнітного поля над підземним трубопроводом;

$$n = L/\Delta y + 1;$$

L – віддаль між 1-ою і n -ою точками вимірювання напруженості;
 $y_i = (i - 1)\Delta y$.

При цьому за допомогою антени $MA2$ визначається кут між блоком антен і віссю трубопровода (при переході через трубопровід при використанні 2-го і 3-го способів необхідно, щоб цей кут був рівний 90°), антени $MA1$, $MA4$, $MA6$ дозволяють строго фіксувати переміщення блоку магнітних антен в перпендикулярному напрямку до осі трубопроводу на величину Δy ($\Delta y = 0,25 \pm 0,001$ м для одного трубопроводу) і значення H_{y_i} , в т. ч. і в точках, кратних Δy , яке вимірюється каналом системи КІ-1 з антеною $MA6$.

Залежність (4.2) може бути представлена і так:

$$I = \frac{2\pi U_{MA6_i}}{\mu_0 z K_{MA6}} (z^2 + ((i-1)\Delta y - d)^2), \quad (4.3)$$

так як

$$H_{y_i} = B_i / \mu_0 = U_{MA6_i} / (K_{MA6} \mu_0). \quad (4.4)$$

Тоді абсолютна похибка визначення струму у стінці одного трубопроводу за допомогою 2-го способу $\Delta_{I \text{ інстр.2}}$ може бути розрахованою так [85-87]:

$$\Delta_{I \text{ інстр.2}} = \sum_{j=1}^t \frac{\partial I}{\partial S_j} \Delta S_j, \quad (4.5)$$

де $t = 4$;

t – кількість змінних аргументів (4.3), які впливають на похибку $\Delta_{I \text{ інстр.2}}$;

S_j – аргументи залежності (4.3);

ΔS_j – абсолютні похибки аргументів S_j .

Аргументами, які вимірюються в кожній із точок $i = 1 \div n$, є тільки U_{MA6_i} і $L_i = \Delta y(i - 1)$. Аргументи z і d і їх похибки Δz і Δd визначаються в результаті попереднього тренування ШНМ, що дозволяє розрахувати числове значення $\Delta_{I \text{ інстр.2}}$ за допомогою (4.5) в загальному.

Конкретний вираз (4.5), за допомогою якого можна розрахувати числові значення складових $\frac{\partial I}{\partial U_{MA6_i}} \Delta U_{MA6_i}$ і $\frac{\partial I}{\partial (\Delta y)} \Delta (\Delta y)$ на основі коефіцієнтів перетворення (калібрування) вимірювальних каналів системи КІ-1 з використанням антен $MA6$ і антен $MA1$ і $MA4$ відповідно, а також інших двох складових $\frac{\partial I}{\partial z} \Delta z$ і $\frac{\partial I}{\partial d} \Delta d$ після уточнення чи визначення z , d , Δz і Δd нейромережею в результаті оброблення конкретних результатів спостережень U_{MA6_i} і $y_i = L_i = \Delta y(i - 1)$ буде таким:

$$\Delta_{I \text{ інстр.2}} = \frac{\partial I}{\partial U_{MA6_i}} \Delta U_{MA6_i} + \frac{\partial I}{\partial \Delta y} \Delta (\Delta y) + \frac{\partial I}{\partial d} \Delta d + \frac{\partial I}{\partial z} \Delta z, \quad (4.6)$$

де

$$\frac{\partial I}{\partial U_{MA6_i}} = \frac{2\pi}{\mu_0 z K_{MA6}} \left(z^2 + ((i-1)\Delta y - d)^2 \right), \quad (4.7)$$

$$\frac{\partial I}{\partial (\Delta y)} = \frac{4\pi U_{MA6_i}}{\mu_0 z K_{MA6}} ((i-1)\Delta y - d)(i-1), \quad (4.8)$$

$$\frac{\partial I}{\partial d} = \frac{-4\pi U_{MA6_i}}{\mu_0 z K_{MA6}} ((i-1)\Delta y - d), \quad (4.9)$$

$$\frac{\partial I}{\partial z} = \frac{4\pi U_{MA6_i}}{\mu_0 K_{MA6}} - \frac{2\pi U_{MA6_i}}{\mu_0 z^2 K_{MA6}} \left(z^2 + ((i-1)\Delta y - d)^2 \right). \quad (4.10)$$

При розрахунку $\Delta_{I \text{ instr.2}}$ і складових похибок за залежностями (4.6) – (4.10) згідно 2-го способу визначення струму необхідно знайти значення складових для кожного i , а потім згідно (4.5) для кожного i визначити $\Delta_{I \text{ instr.2}}$ і за інструментальну похибку $\Delta_{I \text{ instr.2}}$ вибрати найбільше по модулю значення.

Конкретні розраховані значення $\Delta_{I \text{ instr.2}}$ для одного підземного трубопроводу з використанням 2-го способу при $I=250$ мА; $z=1,5$ м; $\Delta z=0,1$ м; $d=2,5$ м; $\Delta d=0,1$ м і раніше приведених значень параметрів μ_0 , K_{MA6} , $U_{MA6_i} = U_{MA6}$, $n=21$, $\Delta y=0,25$ м, $\Delta U_{MA6_i} = \Delta U$, $\Delta(\Delta y)=0,001$ м становлять 5,15 мА. Звідси $\delta_{I \text{ instr.2}} \approx 2,6\%$. Результати числового моделювання роботи ШНМ для одного трубопроводу, приведені в табл. 2.2 вказують, що відносна похибка 2,64% отримується для струму $I=337$ мА.

Розрахунок безпосередньо значень струмів I_1 і I_2 для двох підземних трубопроводів на основі (2.48) є неможливим. Тому значення $\Delta_{I_1 \text{ instr.2}}$ і $\Delta_{I_2 \text{ instr.2}}$ згідно 2-го способу можуть бути оцінені на основі числового моделювання ШНМ, яке виконано у 2-му розділі і здійснено шляхом задання різних профілів горизонтальних складових напруженостей магнітного поля $H_{y_i} = f(y_i)$ над двома підземними трубопроводами для різних струмів I_1 і I_2 , а також інших

параметрів, які впливають на ці профілі (в т. ч. і гранично можливих значень як струмів, так і інших параметрів) з подальшим визначенням за допомогою натренованої нейромережі розробленої системи цих струмів. Порівняння заданих і визначених значень I_1 і I_2 (табл. 2.3) вказує, що найбільші абсолютні значення інструментальних похибок $\Delta_{I_1 \text{ інстр.2}}$ і $\Delta_{I_2 \text{ інстр.2}}$ становлять відповідно 30,97 мА і 21,49 мА, відносні значення 4,13% і 3,07% при струмах $I_1=0,75$ А; $I_2=0,7$ А.

Визначення струму I в одному підземному трубопроводі згідно 3-го способу описано в п.2.5.1.

Інструментальну абсолютну похибку при цьому можна визначити таким чином [88].

Допустимо, що знаходження значень проміжних параметрів $x_1 \div x_3$ на основі 3-х нормальних рівнянь (2.46) в розробленій системі здійснюється методом визначників. Тоді

$$x_1 = D_1/D, \quad x_2 = D_2/D, \quad x_3 = D_3/D, \quad (4.11)$$

де D – визначник системи лінійних рівнянь (2.46),

$D_1 \div D_3$ – часткові визначники системи рівнянь (2.46).

СКВ $\sigma_{\bar{x}_j}$ результату визначення кожного із параметрів $x_1 \div x_3$ розраховують так:

$$\sigma_{\bar{x}_j} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2 A_{h=j}}{(n-m)D}}, \quad (4.12)$$

де $j=1 \div m$; m – кількість нормальних рівнянь, отриманих на основі відповідної кількості n умовних рівнянь;

$$i=1 \div n;$$

n – кількість умовних рівнянь, яка відповідає кількості точок контролю при переході в перпендикулярному напрямку через контрольований підземний трубопровід;

v_i – випадкова похибка i -го умовного рівняння;

$A_{h=j}$ – ад'юнкти елементів головної діагоналі визначника системи рівнянь (2.46), які отримують викреслюванням h -ої лінійки і j -ої колонки визначника D ($h = j$).

Похибку v_i визначають таким чином:

$$v_i = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (a_{ij} x_j - y_i), \quad (4.13)$$

де a_{ij} – коефіцієнти умовних рівнянь при j -их змінних,

$$x_j = x_1 \div x_3, \quad y_i = \Delta y(i-1).$$

Тоді інструментальні похибки визначення проміжних параметрів $x_1 \div x_3$ будуть такими:

$$\Delta x_j = t_{\bar{P}} \sigma_{\bar{x}_j}, \quad (4.14)$$

де $t_{\bar{P}}$ – коефіцієнт Ст'юдента для степеней свободи $n - m$ і заданої ймовірності \bar{P} [88].

Струм I у стінці одного трубопроводу в конкретній точці контролю на основі x_1 і x_2 визначається так:

$$I = x_1 / \sqrt{x_2 - x_3^2}. \quad (4.15)$$

Тоді [89]

$$\begin{aligned} \Delta I_{instr.3} &= \frac{\partial I}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial I}{\partial x_2} \Delta x_2 + \frac{\partial I}{\partial x_3} \Delta x_3 = \\ &= \frac{1}{\sqrt{x_2 - x_3^2}} \Delta x_1 - \frac{1}{2} x_1 \frac{\Delta x_2}{(x_2 - x_3^2)^{\frac{3}{2}}} + x_1 x_3 \frac{\Delta x_3}{(x_2 - x_3^2)^{\frac{3}{2}}}. \end{aligned} \quad (4.16)$$

Аналогічним чином можуть бути визначені струм I і $\Delta I_{instr.3}$ для інших місць переходу через один контрольований трубопровід.

Програма для визначення похибки за допомогою вказаної методики приведена в додатку С. В результаті встановлено, що найбільша похибка $\Delta I_{instr.3} = 8,6$ мА ($\delta I_{instr.3} = 1,84\%$) для струму I в стінці трубопроводу 470 мА.

Методика визначення струмів I_1 і I_2 у стінках двох підземних трубопроводах за допомогою 3-го способу описана в п. 2.5.2. Інструментальні похибки визначення $\Delta I_{1, instr.3}$ і $\Delta I_{2, instr.3}$ рекомендується визначати так.

Значення проміжних змінних параметрів $x_1 \div x_7$ знаходять, наприклад, шляхом розв'язку системи 7-ми нормальних рівнянь (2.51) методом визначників, використовуючи середовище Maple і відповідне програмне забезпечення, а похибки проміжних параметрів $\Delta x_1 \div \Delta x_7$ знаходять аналогічно описаній вище методиці для одного трубопроводу.

Параметри d , b_2 , z_1 , z_2 , I_1 і I_2 для конкретного місця переходу над двома електрично з'єднаними трубопроводами визначають шляхом послідовного розв'язку спочатку систем рівнянь (2.52), потім (2.53), потім (2.54) і накінець (2.55).

Похибки $\Delta I_{1, instr.3}$ і $\Delta I_{2, instr.3}$ визначення струмів I_1 і I_2 за допомогою 3-го способу знаходять на основі таких залежностей для I_1 і I_2 , отриманих із системи рівнянь (2.55):

$$I_1 = \left(x_1 - \frac{bx_1 + dx_1 - x_3}{b} \right) / z_1, \quad (4.17)$$

$$I_2 = \frac{bx_1 + dx_1 - x_3}{bz_2}, \quad (4.18)$$

тобто

$$\Delta_{I_1 \text{ instr.3}} = \sum_{j=1}^{\gamma} \frac{\partial I_1}{\partial M_j} \Delta M_j, \quad (4.19)$$

$$\Delta_{I_2 \text{ instr.3}} = \sum_{j=1}^{\gamma} \frac{\partial I_2}{\partial M_j} \Delta M_j, \quad (4.20)$$

де $\gamma=6$;

γ – кількість змінних аргументів, від яких залежать струми I_1 і I_2 ;

ΔM_j – абсолютні похибки змінних аргументів.

В результаті виконаних розрахунків встановлено, що найбільше абсолютне значення $\Delta_{I_1 \text{ instr.3}}$ становить 6,04 мА ($\delta_{I_1 \text{ instr.3}} \approx 5,47\%$) при $I_1=110$ мА, $\Delta_{I_2 \text{ instr.3}}=40,5$ мА ($\delta_{I_2 \text{ instr.3}} \approx 4,87\%$) при $I_2=910$ мА.

4.2.3. Сумарна похибка системи КІ-1

Сумарна похибка розробленої системи КІ-1 при визначенні струму (струмів) у стінці (стінках) підземного трубопроводу (трубопроводів) буде залежати від об'єкту контролю (одного чи двох підземних трубопроводів) і вибраного способу визначення струму (1-ий, 2-ий, 3-ій способи).

В загальному оцінку стану ізоляційного покриття таких підземних трубопроводів необхідно здійснювати на основі аналізу струмів у стінках контрольованих трубопроводів в різних їх точках в одному і в другому напрямках від точки під'єднання генератора КІ-1-Г до трубопроводу на L довжинах таких ділянок з прив'язкою до системи GPS з метою автоматичної реєстрації конкретних точок контролю трубопроводів. Абсолютні похибки

сучасних систем GPS щодо прив'язки трас трубопроводів до відповідних геодезичних точок відповідного регіону становлять $\pm 0,5$ м.

Сумарна абсолютна похибка Δ розробленої системи КІ-1 визначення величини струму (струмів) у стінках підземних трубопроводів на основі її окремих складових буде такою:

$$\Delta = \Delta_{I \text{ мет.}} + \Delta_{I \text{ зав.}} + \Delta_{I \text{ зовн.ф.}} + \Delta_{I \text{ інстр.}} \quad (4.21)$$

де $\Delta_{I \text{ мет.}}$, $\Delta_{I \text{ зав.}}$, $\Delta_{I \text{ зовн.ф.}}$, $\Delta_{I \text{ інстр.}}$ – методична похибка системи КІ-1; похибка, що викликана впливом зовнішніх електромагнітних завад на струм в стінках трубопроводу і на вимірювальну схему розробленої системи КІ-1; похибка від впливу зовнішніх факторів (температури, вологості навколишнього середовища і ґрунтів, в яких знаходяться контрольовані трубопроводи), стабільності напруг живлення генератора КІ-1-Г і приймача КІ-1-П системи КІ-1; інструментальна похибка розробленої системи КІ-1, відповідно.

Похибка $\Delta_{\text{мет.}}$ залежить від вибраного способу безконтактного визначення струму в стінках трубопроводів (п. 4.2.1). Похибку $\Delta_{I \text{ зав.}}$ можна зменшити шляхом вибору некратних відносно промислової частот генератора КІ-1-Г, наприклад, 868 Гц і за допомогою вимірюваних блоків фільтрації вхідних сигналів розробленої системи контролю. Однак повністю її виключити неможливо. Тому при числовому моделюванні відповідних способів визначення струмів допускалося, що у вхідних сигналах системи все-таки будуть мати місце завади до 5%.

Реально похибку $\Delta_{I \text{ зовн.ф.}}$ можна зменшити шляхом використання акумуляторів живлення із стабільними характеристиками і із значною кількістю ампер-годин, наприклад, 75 А·год., а також конструктивними способами в процесі конструювання системи КІ-1. Виключити вплив вологості і властивостей ґрунтів на сумарну похибку практично неможливо, тому

необхідно при проведенні контролю визначати і вказувати ці характеристики ґрунтів в результатах досліджень.

Похибка $\Delta_{I_{instr}}$ залежить від вибраної методики безконтактного визначення струму в стінках підземних трубопроводів і вона була розглянута в п. 4.2.2.

Таким чином можна вважати, що без урахування похибки від впливу зовнішніх факторів (температури, вологості навколишнього середовища, ґрунтів) відносна похибка розробленої системи при визначенні струмів в стінках підземних трубопроводів для одного трубопроводу при однократному вимірюванні буде не більшою 4,5%, з використанням нейронної мережі – не більше 2,7%, з використанням умовних і нормальних рівнянь – не більше 1,9%, а для двох трубопроводів з використанням нейронної мережі – не більше 4,2%, з використанням умовних і нормальних рівнянь 5,5%.

4.3. Експериментальні дослідження похибок безконтактного визначення струмів в стінках підземних трубопроводів розробленою системою КІ-1

З метою експериментального дослідження похибок розробленої системи КІ-1 безконтактного визначення струмів в стінках підземних трубопроводів, а також їй подібних приладів, була розроблена експериментальна установка (рис. 4.2), яка дозволяє задавати різні значення струмів у двох паралельних провідниках, які моделюють контрольовані трубопроводи. Установка дозволяє моделювати один або два паралельні підземні „трубопроводи”, задавати різну віддаль між двома „трубопроводами” і різні глибини їх залягання в землі. Крім цього можна змінювати віддаль по вертикалі від осей „трубопроводів” до вимірювальної системи з магнітними антенами і КПК, різну швидкість переміщення цієї системи як в перпендикулярному напрямку до осей „трубопроводів”, так і паралельно „трубопроводам”.

Струм в провідниках установки створюється генератором 2 та плавно регулюється змінним опором 3. На опорах 5 знаходяться направляючі 6, по яких рухається платформа 12. Завдяки механізму 11 пристрій, який перевіряється, можна плавно переміщати по платформі в перпендикулярному до „трубопроводів” напрямку. Місця витікання струму моделюються шляхом під’єднання до заземлень через резистори 3. При цьому значення струму, що витікає, контролюється міліамперметром.

Наявність амперметрів 4 і змінних електричних опорів 3 дозволяє задавати необхідні значення струмів в стінках підземних „трубопроводів”, що важливо для визначення метрологічних характеристик реальних досліджуваних систем і приладів.

Експериментально отримані на макеті розробленої установки (рис. 4.2) такі похибки розробленої системи КІ-1 безконтактного визначення струмів для струму в стінці трубопроводу $I = 250$ мА:

для 1-го „трубопроводу” без конкретної орієнтації магнітних антен системи з одноразовим вимірювання напруженості магнітного поля $\Delta_{I_{instr.1}} = 10,63$ мА; $\delta = 4,15\%$; з використанням нейронної мережі $\Delta_{I_{instr.1}} = 4,95$ мА; $\delta = 1,98\%$; з використанням умовних і нормальних рівнянь $\Delta_{I_{instr.1}} = 3,62$ мА; $\delta = 1,45\%$;

для 1-го із двох „трубопроводів” із струмом $I_1 = 250$ мА і з використанням нейронної мережі $\Delta_{I_1_{instr.2}} = 8,61$ мА; $\delta = 3,44\%$; з використанням умовних і нормальних рівнянь $\Delta_{I_1_{instr.2}} = 9,78$ мА; $\delta = 3,91\%$;

для 2-го із двох „трубопроводів” із струмом $I_2 = 248$ мА і з використанням нейронної мережі $\Delta_{I_2_{instr.2}} = 7,47$ мА; $\delta = 3,45\%$; з використанням умовних і нормальних рівнянь $\Delta_{I_2_{instr.2}} = 9,85$ мА; $\delta = 3,98\%$.

Вказані вище результати підтверджують передбачувані значення похибок системи КІ-1 визначені в п.4.2.

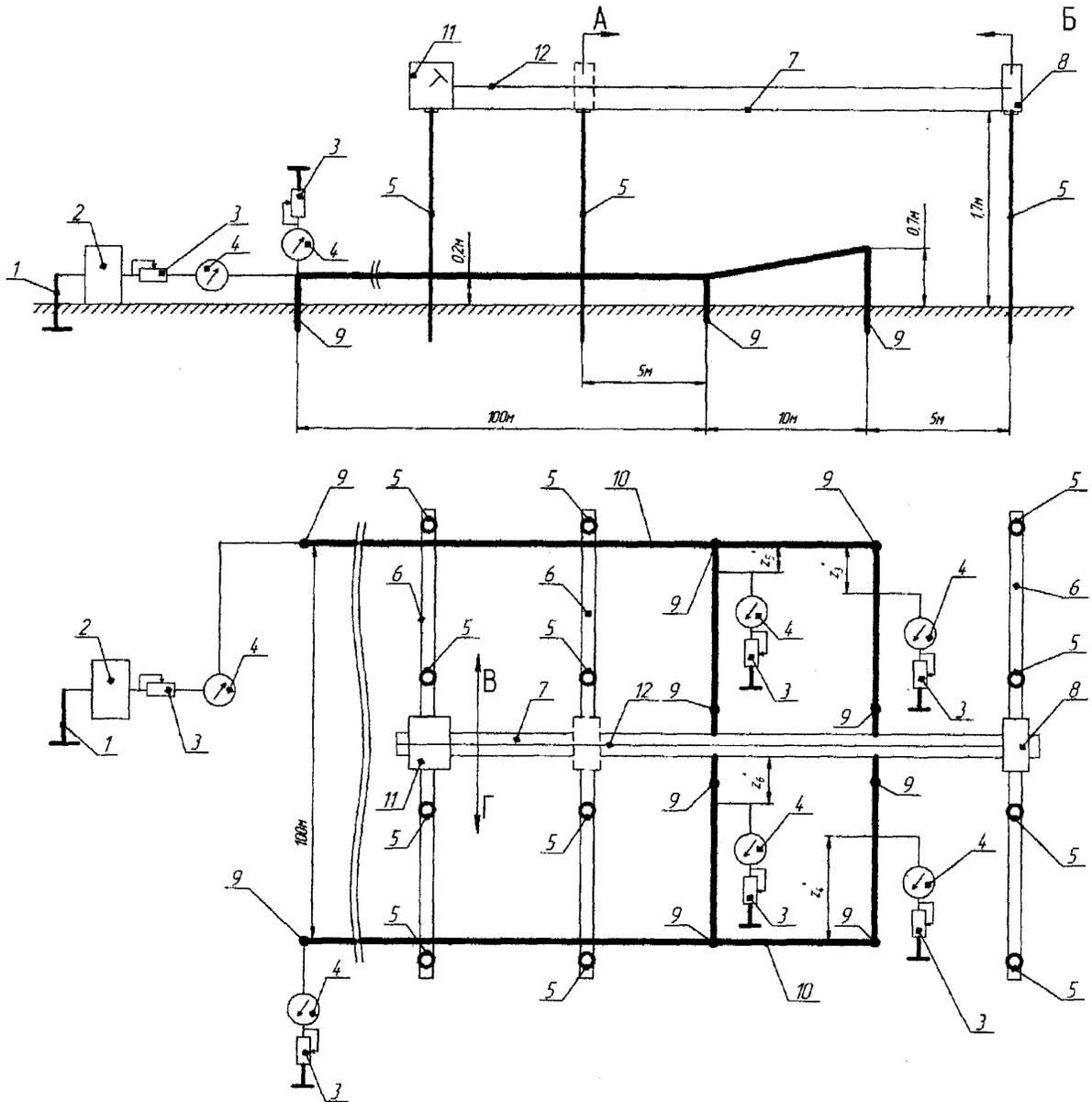


Рис. 4.2. Схема установки для дослідження похибок визначення струмів у підземних „трубопроводах” розробленою системою КІ-1:
 1 – штир для заземлення; 2 – генератор; 3 – змінні електричні опори;
 4 – амперметри; 5 – механічні стійки; 6 – направляючі; 7 – мостик;
 8 – вимірювальна система з магнітними антенами і КПК; 9 – штирі для утримування проводу з ізоляторами; 10 – провід алюмінієвий; 11 – механізм для переміщення блоку 8; 12 – трос

Висновки до розділу

Приведені в четвертому розділі дисертаційної роботи результати можна звести до таких висновків:

а) здійснено аналіз основних факторів, які впливають на точність визначення струмів в стінках одного підземного трубопроводу за допомогою способу, який передбачає вимірювання напруженості блоками магнітних антен без їх конкретної орієнтації по відношенню до напрямку траси трубопроводу, у стінках одного і двох підземних трубопроводів з використанням розробленої натренованої нейронної мережі і за допомогою умовно-нормальних рівнянь при переході над трубопроводами в перпендикулярному напрямку до їх траси. Показано, що такими факторами є похибки каналів вимірювання напруженостей магнітного поля системи KI-1, значення цих напруженостей, похибки значення віддалі між блоками антен розробленої системи і безпосередньо значення цієї віддалі;

б) детально проаналізовані методичні, інструментальні і сумарна похибки розробленої системи KI-1 при безконтактному визначенні нею струмів у стінках підземних трубопроводів різними запропонованими способами. Розроблені методики визначення інструментальних похибок системи при визначенні струмів за допомогою розроблених нейронних мереж і способу умовно-нормальних рівнянь на основі надлишкової кількості вимірної інформації. В результаті встановлено, що відносна похибка розробленої системи при визначенні струмів в стінках підземних трубопроводів для одного трубопроводу при однократному вимірюванні буде не більшою 4,5%, з використанням нейронної мережі – не більше 2,7%, з використанням умовних і нормальних рівнянь – не більше 1,9%, а для двох трубопроводів з використанням нейронної мережі – не більше 4,2%, з використанням умовних і нормальних рівнянь 5,5%;

в) розроблена установка для експериментального дослідження метрологічних характеристик систем безконтактного визначення струмів в

стінках підземних трубопроводів, за допомогою якої можна також досліджувати метрологічні характеристики різних пристроїв для безконтактного контролю струмів у стінках підземних трубопроводів;

г) проведені дослідження на експериментальній установці метрологічних характеристик розробленої системи КІ-1 безконтактного визначення струмів в стінках трубопроводів, які визначили такі метрологічні показники цієї системи: відносна похибка розробленої системи при визначенні струмів в стінках підземних трубопроводів для одного трубопроводу без орієнтації магнітних антен не буде більшою 4,5%; з використанням нейронної мережі – не більше 2,3%; з використанням умовних і нормальних рівнянь – не більше 1,6%, а для двох трубопроводів з використанням нейронної мережі – не більше 3,8%; з використанням умовно-нормальних рівнянь – не більше 4,6%, що дозволяє для конкретних умов з урахуванням необхідної точності та продуктивності контролю вибирати відповідний спосіб безконтактного визначення струмів у стінках підземних трубопроводів.

РОЗДІЛ 5

ВИПРОБУВАННЯ РОЗРОБЛЕНОЇ СИСТЕМИ КІ-1 ВИЗНАЧЕННЯ СТРУМІВ У СТІНКАХ ПІДЗЕМНИХ ТРУБОПРОВОДІВ

Оцінку роботи способів, запропонованих в розділі 2, ефективності конструктивних рішень, розроблених в розділі 3 та правильності метрологічного аналізу, виконаного в розділі 4 здійснено шляхом випробувань розробленої системи.

Системою безконтактного визначення струму в процесі контролю стану ізоляційного покриття підземних трубопроводів було проведено лабораторні, польові та промислові випробування.

Позитивні результати проведених випробувань дозволять використовувати систему КІ-1 для виконання неруйнівного контролю стану ізоляційного покриття підземних трубопроводів.

5.1. Лабораторні випробування системи КІ-1

Лабораторні випробування розробленої системи КІ-1 безконтактного визначення струмів у стінках підземних трубопроводів виконувалися для таких цілей:

- перевірити відповідність параметрів генератора КІ-1-Г системи КІ-1 заявленим характеристикам,
- перевірити роботу вимірювальних каскадів приймача КІ-1-П та системи КІ-1 контролю в цілому на макеті трубопроводу.

5.1.1 Методика проведення лабораторних випробувань системи КІ-1

Дослідження роботи генератора КІ-1-Г здійснювалося шляхом

під'єднання до вихідних його клем навантаження та вимірювання таких параметрів, як струм, напруга та частота вихідного сигналу генератора (рис. 5.1).

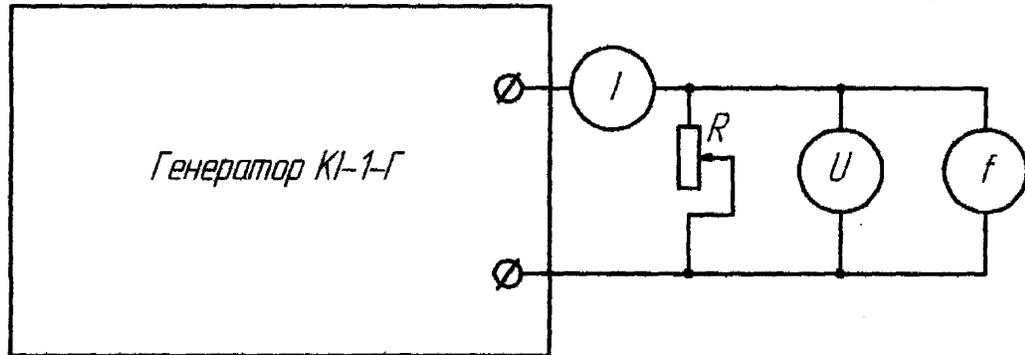


Рис. 5.1. Схема установки для перевірки роботи генератора KI-1-Г системи KI-1

Технічні характеристики генератора KI-1-Г:

- вихідна потужність	40 Вт
- діапазон робочих частот	500 – 1500 Гц
- крок задання робочої частоти	1 Гц
- похибка задання частоти	не більше 0,2 Гц
- час роботи генератора в режимі максимального навантаження	не менше 4 год

Методика лабораторних випробувань системи KI-1 приведена в додатку Т.1.

Перед початком випробувань генератор KI-1-Г включають на 15 хв. для виходу на робочий режим. Акумуляторна батарея перед випробуваннями має бути повністю заряджена.

Частоту роботи генератора KI-1-Г необхідно встановити рівною 500 Гц. Резистор R (рис. 5.1) встановлюють в положення максимального опору. Шляхом перемикання регулятора узгодження на виході генератора встановлюють значення напруги 80 В. Зміною опора резистора R досягають споживаної потужності 40 Вт, яку визначають із залежності:

$$P = UI. \quad (5.1)$$

Через кожні 30 хвилин роботи на протязі 4 годин необхідно записувати значення напруги, силу струму та частоту сигналу в протокол (додаток Т.2).

Аналогічну перевірку відповідності параметрів генератора проводять також на частотах 1000 та 1500 Гц. Перед кожним із таких вимірювань необхідно обов'язково дозарядити акумуляторну батарею генератора.

Для перевірки роботи приймача КІ-1-П та системи контролю в цілому була розроблена схема, приведена на рис. 5.2. В якості моделі трубопроводу використовується ізольований провідник 4 довжиною 55 м. З одного кінця цей провідник заземляють за допомогою заземлення 4, а з іншого через амперметр 5 під'єднують до однієї із вихідних клем генератора 2. Інший вихід генератора заземляють. Сумарна довжина лінії під'єднання провідника 4 до генератора повинна складати 10 м та бути перпендикулярною до нього.

Випробування приймача проводять на ділянці *A-D* (рис. 5.2). Для точного задання висоти використовують опору 7, яка дозволяє переміщувати приймач на висоті 1 м і в межах 5 м над провідником 4.

Випробування починають із вмикання та прогріву приймача КІ-1-П та генератора КІ-1-Г протягом 15 хв. Робочу частоту встановлюють рівною 868 Гц.

Після прогрівання генератора до нього під'єднують навантаження та виконують узгодження для досягнення струму в провіднику близько 150 мА. Після цього в точках *B* та *C* під'єднують підстроювальні резистори 6, які через міліамперметри змінного струму з'єднані із заземленням 3. В точці *B* підстроювальним резистором виставляють струм стікання рівний 100 мА, а в точці *C* - 25 мА. При цьому відбудеться збільшення значення сили струму на виході генератора. Значення струмів, виміряних за допомогою міліамперметрів 5, записують в протокол випробувань (додаток Т.1)

Проведення вимірювань починають в точці *A*, над якою перпендикулярно до провідника розміщують опору 7 так, щоб її центр

знаходився приблизно над цим провідником. Приймач розміщують на опорі із однієї її сторони так, як це зображено на рис. 5.2. Після цього вмикають режим вимірювання і плавно переміщують приймач по опорі до протилежного кінця.

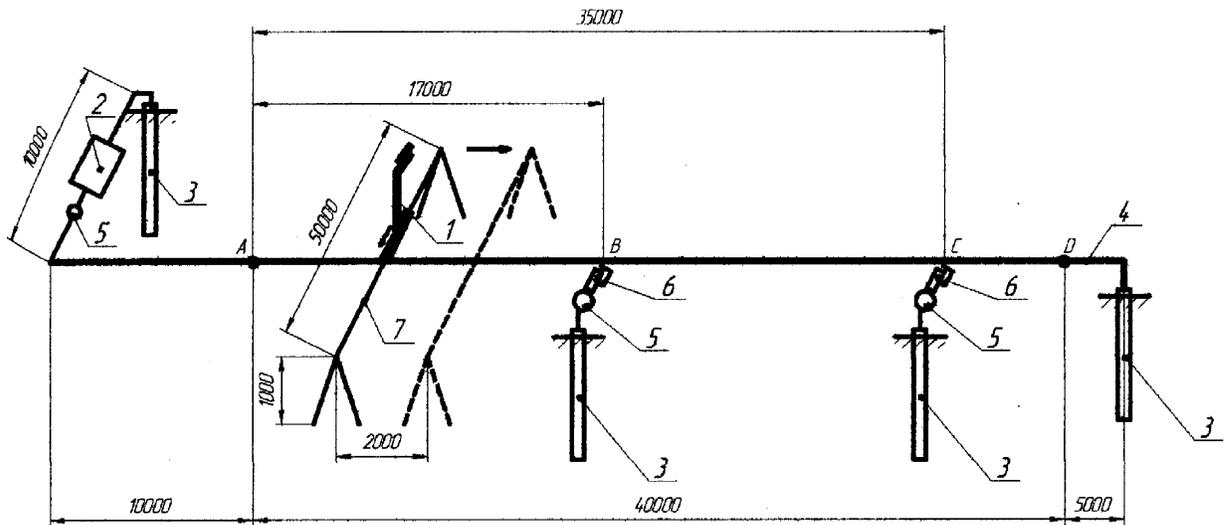


Рис. 5.2. Схема установки для перевірки роботи системи КІ-1:
 1 – приймач КІ-1-П; 2 – генератор КІ-1-Г; 3 – виносне заземлення; 4 –
 ізолюваний провідник; 5 – міліамперметр змінного струму; 6 –
 підстроювальний резистор; 7 - опора

Отримані дані опрацьовуються портативним комп'ютером за допомогою способів, приведених в п. 2.4 – 2.5.

Крім цього виконується розміщення пристрою в довільній точці на опорі із повертанням системи магнітних антен відносно лінії, перпендикулярної до провідника на довільний кут в межах $\pm 45^\circ$. Це дозволить перевірити роботу способу, запропонованого в п. 2.3. Дані таких вимірювань також заносяться в протокол лабораторних випробувань.

Після виконання вказаних вимірювань опора переноситься на відстань 2 м вздовж провідника і знову повторюються операції по визначенню інформативних параметрів.

В результаті будуть отримані результати вимірювань трьома способами вздовж провідника в точках, які віддалені одна від одної на відстань 2 м. Всі визначені дані записуються в протокол лабораторних випробувань.

5.1.2 Аналіз результатів лабораторних випробувань

Результати виконаних випробувань приведені в додатку Т.3. Перевірка роботи генератора КІ-1-Г показала, що заявлені характеристики генератора відповідають отриманим (табл. 5.1.).

Проведені вимірювання струму на моделі трубопроводу показали місця витікання струму. Графік зникання струму приведений на рис. 5.3. При виконанні лабораторних випробувань опрацювання вимірних даних виконувалися за допомогою трьох методик – однократних вимірювань (п. 2.3) та багатократних вимірювань (п.п. 2.4 - 2.5).

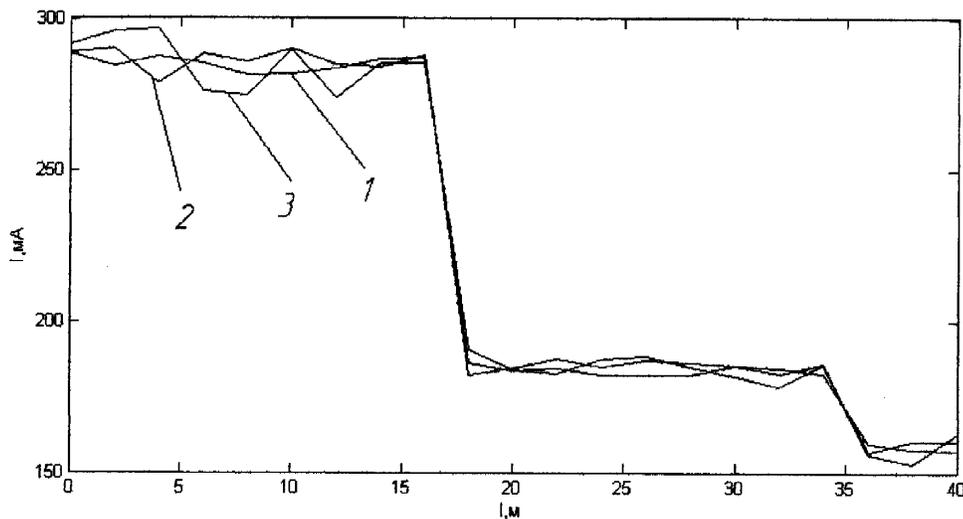


Рис. 5.3. Зникання струму вздовж провідника з місцями витікання в процесі лабораторних випробувань:

1 – струм, визначений методикою обробки надлишкових даних; 2 – струм, визначений за допомогою нейронної мережі; 3 – струм визначений методикою з однократним вимірюванням

Таблиця 5.1.

Результати визначення характеристик генератора КІ-1-Г в результаті лабораторних випробувань

Час, хв	Роб. частота, Гц	Реальна частота, Гц	Пох. частоти, Гц	U , В	I , А	P , Вт
0	500	499,84	-0,16	78,92	0,501	39,58
30	500	499,82	-0,18	79,73	0,500	39,89
60	500	500,01	0,01	79,77	0,498	39,75
90	500	500,11	0,11	80,81	0,498	40,30
120	500	500,17	0,17	79,55	0,501	39,93
150	500	499,85	-0,15	81,20	0,497	40,41
180	500	500,02	0,02	79,37	0,499	39,68
210	500	499,99	-0,01	79,79	0,498	39,76
240	500	499,81	-0,19	78,91	0,502	39,64
0	1000	999,93	-0,07	79,10	0,501	39,63
30	1000	999,86	-0,14	80,73	0,500	40,36
60	1000	1000,11	0,11	80,18	0,499	40,07
90	1000	999,92	-0,08	80,45	0,497	40,04
120	1000	1000,01	0,01	79,14	0,500	39,64
150	1000	999,86	-0,14	81,07	0,497	40,35
180	1000	1000,04	0,04	80,58	0,497	40,12
210	1000	999,90	-0,10	79,68	0,500	39,85
240	1000	1000,06	0,06	80,35	0,497	40,01
0	1500	1500,07	0,075	79,55	0,501	39,90
30	1500	1500,09	0,09	78,90	0,501	39,57
60	1500	1499,98	-0,02	79,30	0,501	39,73
90	1500	1499,83	-0,17	79,52	0,498	39,62
120	1500	1499,89	-0,11	79,24	0,500	39,68
150	1500	1500,16	0,16	79,46	0,500	39,73
180	1500	1499,86	-0,14	79,45	0,502	39,91
210	1500	1500,13	0,13	78,98	0,500	39,54
240	1500	1500,01	0,01	80,56	0,501	40,40

Отже проведені лабораторні випробування засвідчили працездатність запропонованих способів безконтактного визначення струмів у стінці підземного трубопроводу.

5.2. Польові випробування системи КІ-1

Польові випробування були проведені на навчально-науковому полігоні

кафедри ТД і М ІФНТУНГ, структура якого приведена на рис. 5.4.

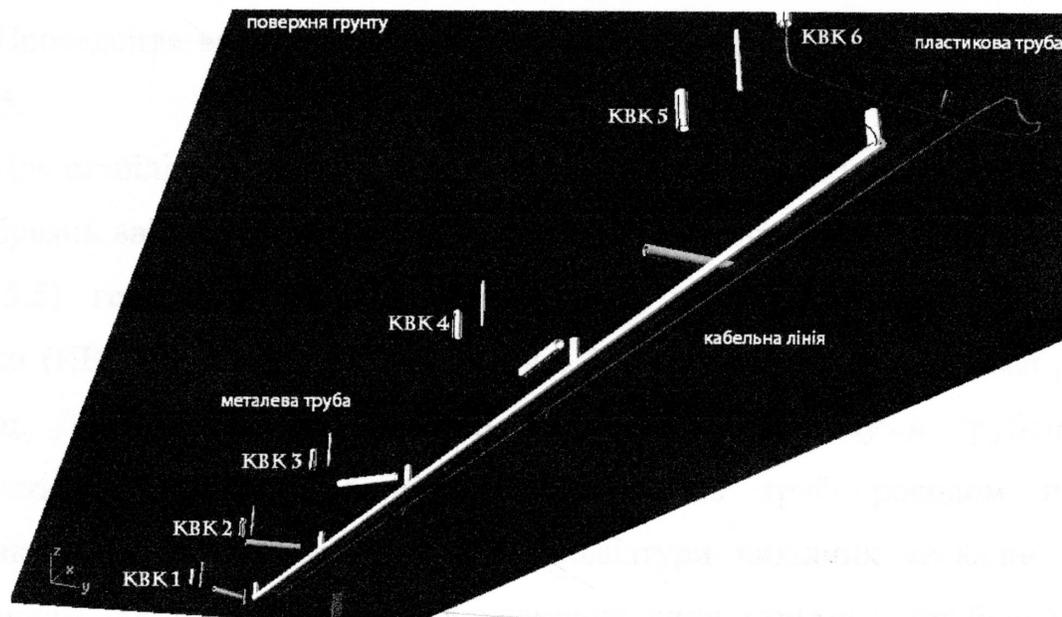


Рис. 5.4. Структура навчального полігону каф ТД і М ІФНТУНГ

На базі навчально-наукового полігону можливе виконання таких операцій: пошук траси сталюого підземного трубопроводу або кабелю з поверхні землі; визначення глибини залягання сталюого підземного трубопроводу або кабелю з поверхні землі; визначення місць пошкодження ізоляційного покриття сталюого підземного трубопроводу або кабелю з поверхні землі; проведення комплексу електрометричних вимірювань для демонстрації оцінки корозійного стану сталюого підземного трубопроводу; проведення магнітної і електричної зйомки для виявлення траси пролягання сталюого і поліетиленового трубопроводу; дистанційний пошук витоків флюїдів з трубопроводів.

Для випробувань використовувався металевий трубопровід із пошкодженим ізоляційним покриттям. Під'єднання до трубопроводу здійснюється через контрольно-вимірювальний пункт (КВП). Полігон в своєму складі містить заземлення.

Для імітації складних умов пошуку над металевим трубопроводом розміщено декілька металевих предметів.

5.2.1. Методика проведення польових випробувань системи КІ-1

Проведення випробувань використовувалося за схемою, зображеною на рис. 5.5.

Для стабілізації характеристик системи КІ-1 її необхідно перед початком випробувань ввімкнути і прогріти протягом 15 хв. Згідно із схемою контролю (рис. 5.5) генератор необхідно під'єднати до контрольно-вимірювальної колонки (КВП) і до контуру заземлення. Робоча частота вибирається рівною 868 Гц. Для досягнення оптимального значення струму в трубопроводі виконується узгодження виходу генератора із трубопроводом шляхом перемикання відповідними кнопками клавіатури вихідних каскадів. Перед виконанням обстеження задається величина сили струму в трубопроводі – 350 мА.

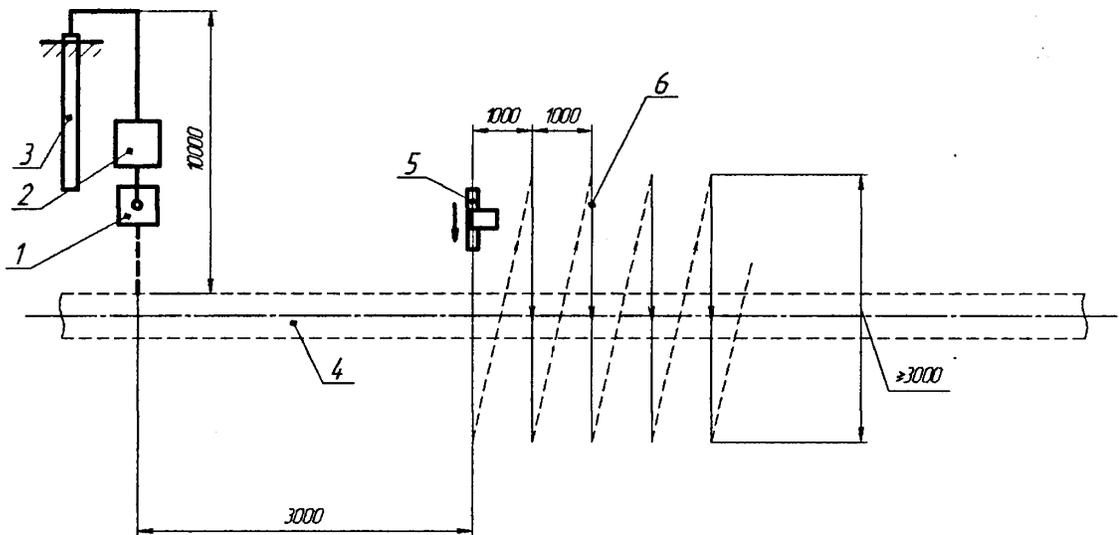


Рис. 5.5. Схема проведення польових випробувань:

1-контрольно-вимірювальна колонка; 2-генератор КІ-1-Г; 3-заземлення; 4-трубопровід; 5-приймач КІ-1-П; 6-маршрут руху оператора

Обов'язковою умовою є перпендикулярність ланки КВП-генератор-заземлення до осі трубопроводу та загальна її довжина не менше 10 м.

Вимірювання починають на відстані 3 м від точки підключення генератора. Для цього розміщують приймач із однієї сторони трубопроводу, що легко зробити за показами картки № 1 програмного забезпечення (ПЗ) портативного комп'ютера (перша вкладка ПЗ). Далі виконують орієнтацію системи перпендикулярно до осі трубопроводу. Для цього шляхом повертання приймача КІ-1 встановлюють таке його положення, при якому значення індикатора «Кут» (друга вкладка ПЗ) буде мінімальним. В такому положенні вмикають режим вимірювання приймача і проходять перпендикулярно до осі трубопроводу. На графіку, який буде представлений на екрані КПК відображаються величини виміряних сигналів.

Після закінчення проходження через трубопровід режим вимірювання вмикають. Необхідно слідкувати, щоб довжина шляху при проходженні через вісь трубопроводу була не меншою 3 м. Це можна перевірити по отриманому профілю напруженості магнітного поля, який виводиться на екран КПК після закінчення вимірювань. При необхідності повторного визначення профілю напруженості магнітного поля експеримент можна повторити.

Визначення наступного профілю здійснювалося на відстані 1 м від попереднього вздовж осі труби. Відстань відзначалася за допомогою мірного колеса або рулетки. Траєкторія переміщення оператора показана на рис. 5.5 (поз. 6).

В результаті виконання вимірювань згідно вказаної методики отримують профілі горизонтальної складової напруженості магнітного поля вздовж трубопроводу з кроком 1 м, за якими визначають значення струму та глибини залягання трубопроводу.

5.2.2. Аналіз результатів польових випробувань системи КІ-1

Визначення сили струму в контрольованому трубопроводі здійснювалося автоматично після закінчення проходження із приймачем через вісь цього трубопроводу в конкретній його точці. Обчислення струму відбувалося з

використанням методики опрацювання надлишкових даних. Результат обчислень приведений у протоколі випробувань (додаток У.2) та у вигляді графіку зміни струму вздовж трубопроводу на рис. 5.6.

На рис. 5.6 є ділянка (0 – 4м), де струм зростає. Це пояснюється тим, що вхідні кола приймача спотворили прийнятий сигнал, який мав високу амплітуду. Тому у вказаних межах визначені значення струму можуть бути недостовірними.

Оцінка якості ізоляційного покриття виконується за графіком затухання струму (рис. 5.7), який визначається за залежністю (1.20).

В даному випадку $\Delta l = 1$ м.

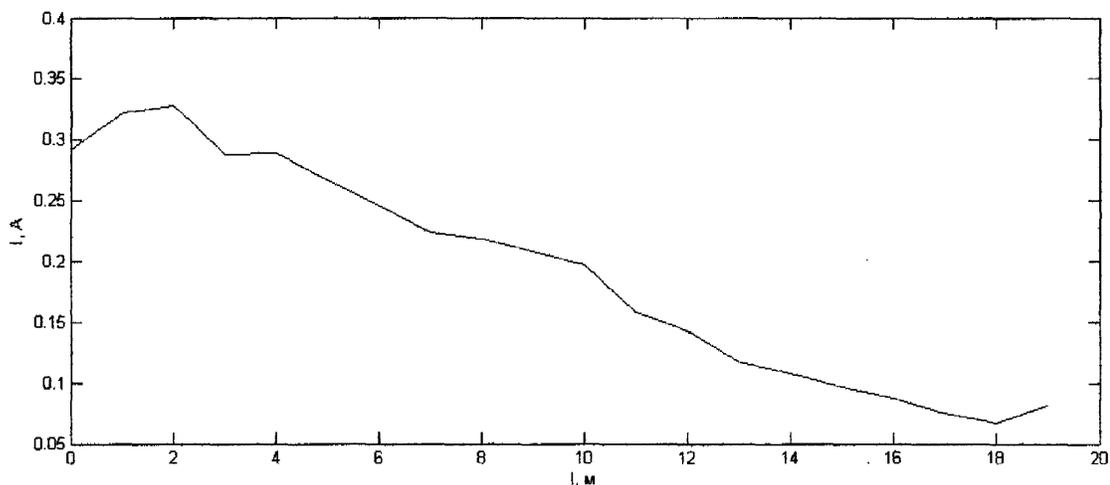


Рис. 5.6. Графік зміни струму в стінках трубопроводу вздовж його траси в процесі польових випробувань системи КІ-1

За результатами проведених польових випробувань було встановлено дві ділянки значного зникання струму на відстані 11 м та 13 м від точки початку обстеження, в яких наявні пошкодження ізоляційного покриття. Високе значення зникання струму вздовж всієї ділянки трубопроводу пояснюється великою вологістю ґрунту.

Зникання струму на ділянці 0 - 4 м не приймалося до уваги, оскільки, як вже зазначалося, ці дані на таких віддальх від точки під'єднання генератора

КІ-1-Г можуть бути недостовірними.

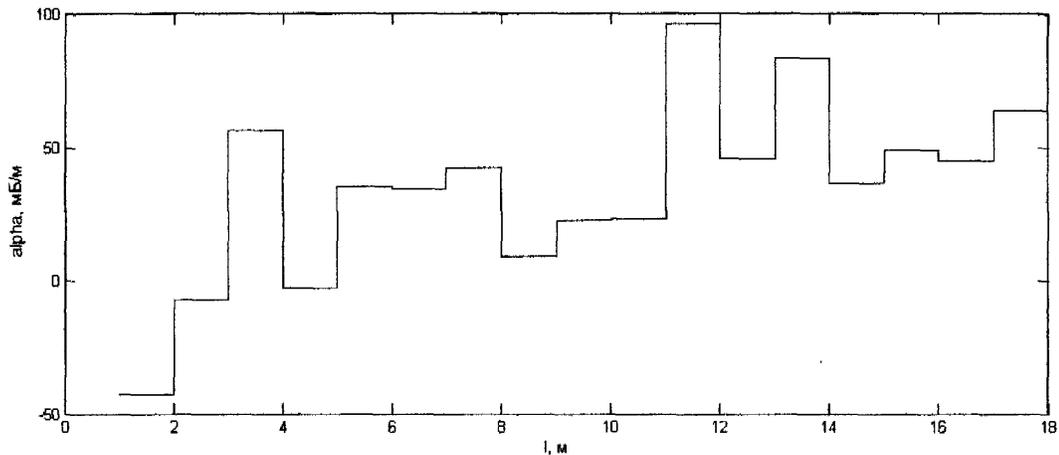


Рис. 5.7. Графік зникання струму вздовж контрольованої ділянки трубопроводу при польових випробуваннях системи КІ-1

5.3. Промислові випробування системи КІ-1

Для перевірки придатності запропонованих методик та системи КІ-1 для безконтактного визначення струму в підземних трубопроводах на діючих підземних трубопроводах були проведені промислові випробування. Перевірка виконувалася на підземному газопроводі діаметром 1420 мм КС «Богородчани» УМГ «Прикарпаттрансгаз» та на нафтопроводі діаметром 530 мм в НГВУ «Надвірнанафтогаз».

5.3.1 Методики проведення промислових випробувань системи КІ-1

При проведенні промислових випробувань системи КІ-1 використовувалася схема, яка зображена на рис. 5.8.

Перед початком вимірювань виконують прогрівання системи КІ-1 протягом 15 хв. Генератор повинен бути під'єднаний в обох випадках (як на КС «Богородчани», так і при випробуваннях в НГВУ «Надвірнанафтогаз») до контрольованого трубопроводу і наявного контура заземлення. Лінії

під'єднання генератора до заземлення та трубопроводу повинні бути перпендикулярні до осі контрольованого трубопроводу. Мінімальна довжина ланки заземлення повинна бути не меншою 10 м. Робочу частоту встановлюють рівною 868 Гц.

Шляхом узгодження генератора із контрольованими трубопроводами встановлюють необхідне значення сили струму в трубопроводі. Для підземного газопроводу – 600 мА, а для нафтопроводу – 400 мА. Для підземного газопроводу КС «Богородчани» необхідно встановлювати більший струм із-за великого діаметра цього трубопроводу – 1420 мм.

Перше вимірювання необхідно провести на відстані 10 м від кранового вузла. Маршрут руху оператора зображений на рис. 5.8. Вимірювання значень напруженостей магнітного поля здійснюють аналогічно, як було описано в п. 5.2.1. Відстань між профілями в обох випадках повинна становити 2 м.

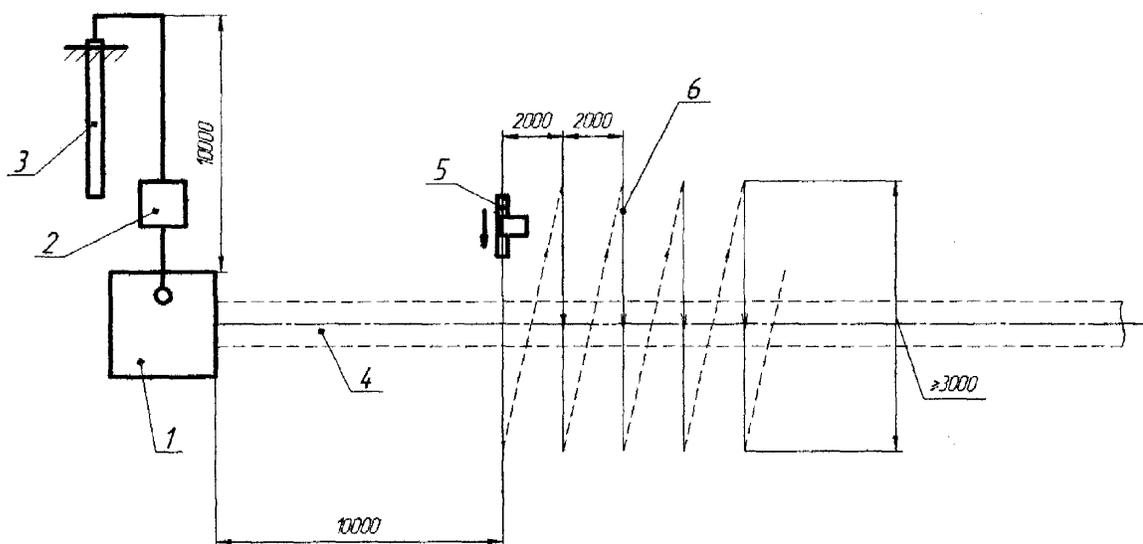


Рис. 5.8. Схема проведення промислових випробувань системи КІ-1:
1-крановий вузол; 2-генератор КІ-1-Г; 3-виносне заземлення; 4-трубопровід; 5-
приймач КІ-1-П; 6-маршрут руху оператора

За такою методикою будуть визначені струми в стінках трубопроводів з кроком 2 м, на основі яких можна визначити коефіцієнт заникання струму.

5.3.2 Аналіз результатів промислових випробувань системи КІ-1

Згідно з методикою промислових випробувань, описаною в п 5.3.1, було визначено зміну струму в стінках підземного газопроводу КС «Богородчани» на ділянці довжиною 25 м (рис. 5.9).

На основі отриманих даних струму було розраховано зникання струму, що показано на рис 5.10.

За результатами проведених промислових випробувань було встановлено, що ізоляція за винятком проміжку 14-20 м добра (коефіцієнт зникання струму становить 0,35-4,33 мБ/м). Аналізуючи зникання струму, можна сказати, що на даній ділянці таке зникання виникло в результаті екранування сигналу від трубопроводу. В цьому місці знаходилися бетонні плити, в яких могла бути металева арматура.

Провівши додатково обчислення затухання струму за вказаною залежністю на ділянці 14-20 м за значеннями сили струму в точках 12 і 20 м (до і після бетонних плит), було встановлено, що стан ізоляційного покриття на цьому проміжку добрий (коефіцієнт зникання складає 1,206 мБ/м).

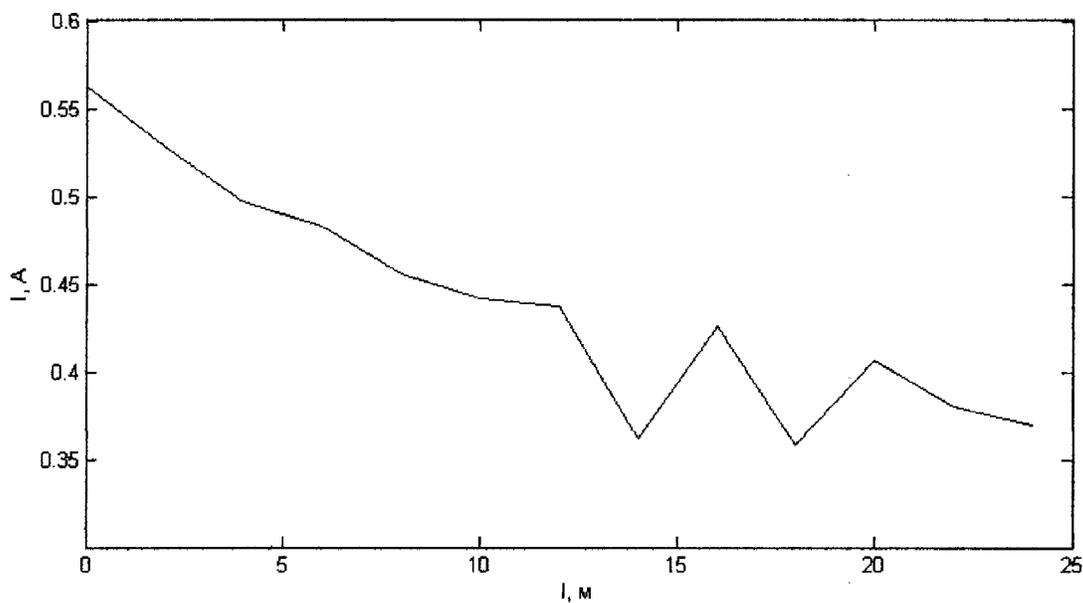


Рис. 5.9. Графік зміни струму в стінках підземного газопроводу діаметром 1420 мм на КС «Богородчани»

Графік зміни струму при обстеженні нафтопроводу діаметром 530 мм в НГВУ «Надвірнанафтогаз» приведений на рис. 5.11. Протяжність ділянки трубопроводу, де виконувались вимірювання, становила 70 м. Графік заникання струму приведений на рис. 5.12.

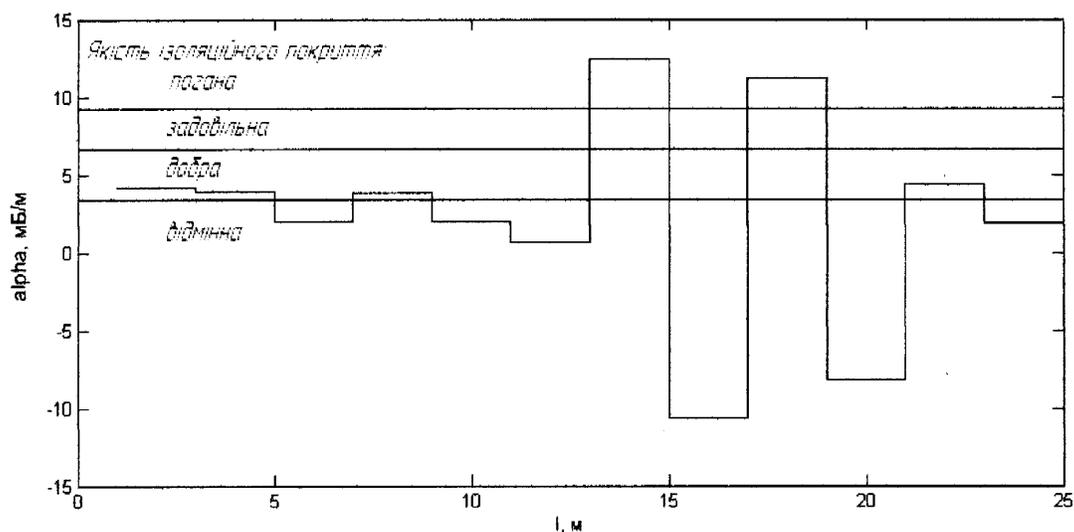


Рис. 5.10. Графік заникання струму в стінках підземного газопроводу діаметром 1420 мм на КС «Богородчани»

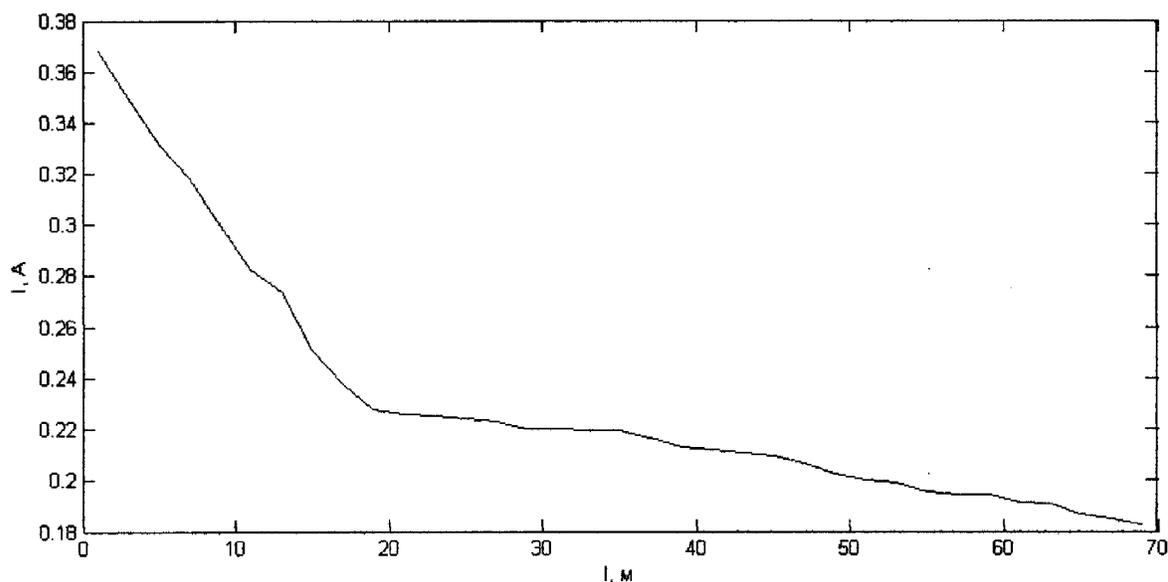


Рис. 5.11. Графік зміни струму в стінках нафтопроводу діаметром 530 мм в НГВУ «Надвірнанафтогаз»

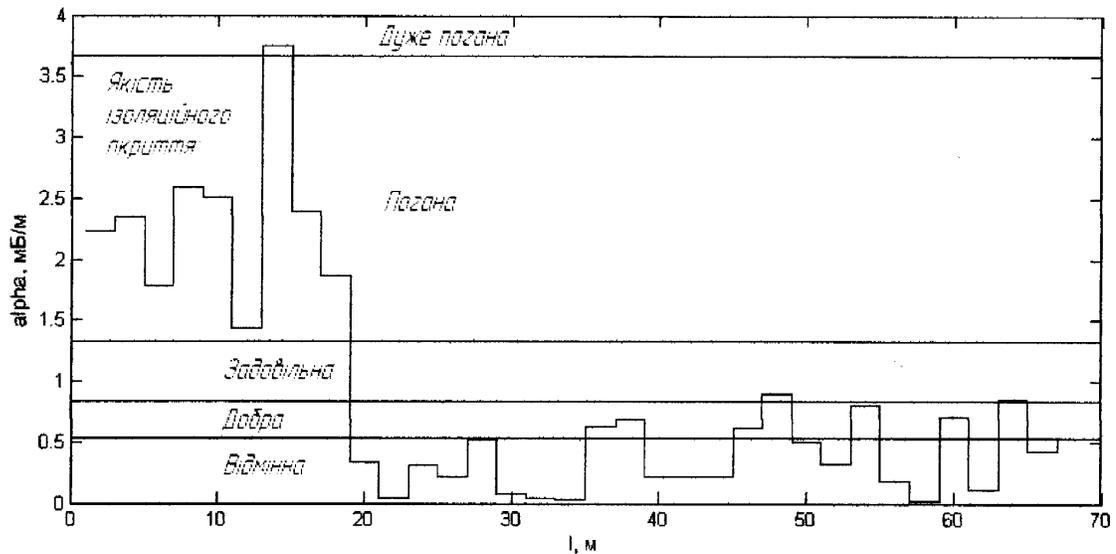


Рис. 5.12. Графік зникання струму в стінках нафтопроводу діаметром 530 мм в НГВУ «Надвірнанафтогаз»

За результатами проведених промислових випробувань було встановлено, що на ділянці 0-18 м від точки початку обстеження присутні численні пошкодження ізоляційного покриття (коефіцієнт зникання струму 1,430-2,59 мБ/м). На ділянках 46-48 та 64-66 м якість ізоляційного покриття задовільна (0,89 мБ/м та 0,85 мБ/м відповідно). На інших ділянках цього нафтопроводу якість ізоляційного покриття добра (<0,81 мБ/м).

5.4. Загальний аналіз результатів випробувань розробленої системи КІ-1 і рекомендації щодо її використання

Проведені лабораторні дослідження дали можливість перевірити роботу способів, запропонованих в п. 2.2 – 2.5, та технічних характеристик розробленої системи контролю КІ-1. За результатами проведення випробувань запропоновано, що роботу системи КІ-1 та вказаних способів необхідно перевірити на реальних трубопроводах.

При проведенні польових випробувань було встановлено два місця значного затухання струму, в яких знаходяться штучно зроблені дефекти. Для

визначення величини струму використовувалася методика умовно-нормальних рівнянь (п.2.5).

Методики, протоколи та результати промислових випробувань приведені в додатках Ф-Х.

За результатами промислових випробувань на підземному газопроводі КС «Богородчани» пошкоджень ізоляційного покриття не було виявлено, а на нафтопроводі в НГВУ «Надвірнанафтогаз» виявлено ділянку із численними пошкодженнями та два місця погіршеного ізоляційного покриття.

Висновки до розділу

За результатами перевірки роботи запропонованих способів та системи КІ-1 можна зробити такі висновки:

а) за результатами лабораторних випробувань встановлено, що технічні характеристики розробленої системи КІ-1 відповідають прогнозованим;

б) згідно з лабораторними випробуваннями встановлено, що максимальна відносна похибка визначення струму системи КІ-1 з використанням 1-го способу становить 4,25 %, з використанням 2-го способу надлишкових даних – 1,9%, з використанням 3-го способу – 1,4%

г) за результатами проведених польових випробувань системи КІ-1 з використанням 1-ої методики визначення струму було виявлено зникання струму на ділянці 11 м та 13 м від точки початку обстеження, в яких наявні пошкодження ізоляційного покриття;

д) за результатами проведених промислових випробувань системи КІ-1 з використанням 2-ої методики визначення струму на підземному газопроводі КС «Богородчани» було встановлено, що ізоляція на контрольованій ділянці трубопроводу добра.

ж) за результатами проведених промислових випробувань системи КІ-1 з використанням 3-ої методики визначення струму на нафтопроводі в НГВУ «Надвірнанафтогаз» було встановлено, що на ділянці 0-18 м від точки початку

обстеження присутні численні пошкодження ізоляційного покриття (коефіцієнт заникання струму 1,430-2,59 мБ/м). На ділянках 46-48 та 64-66 м якість ізоляційного покриття задовільна (0,89 мБ/м та 0,85 мБ/м відповідно). На інших ділянках якість ізоляційного покриття підземного нафтопроводу добра (<0,81 мБ/м).

ВИСНОВКИ

В результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень вирішена важлива науково-технічна задача, яка полягає в розробці системи і методик безконтактного визначення струмів в стінках підземних трубопроводів, що забезпечує можливість оцінки стану ізоляційного покриття трубопроводів, підвищення точності результатів визначення струмів і продуктивності процесу безконтактних вимірювань. При цьому отримані такі результати:

1. Проведений аналіз відомих методів, способів та пристроїв для визначення струмів в стінках ізольованих підземних трубопроводів. На підставі проведеного аналізу визначено основні недоліки існуючих методів і приладів безконтактного визначення струмів в стінках підземних трубопроводів і сформульовані завдання, що потребують вирішення, та обрано напрямки подальших теоретичних та експериментальних досліджень.

2. Отримані аналітичні залежності для визначення струму в стінці одного підземного трубопроводу без необхідності орієнтації бази системи контролю в перпендикулярній до осі трубопроводу площині, що дало можливість зменшити до п'яти кількість магнітних антен.

3. Запропонований спосіб автоматичного профілювання горизонтальної складової напруженості магнітного поля при проходженні над підземними трубопроводами в перпендикулярному до їх осей напрямку, що дозволяє зменшити тривалість процесу отримання цих профілів напруженості.

4. Запропонована і експериментально підтверджена можливість використання трьохшарової нейронної мережі для безконтактного визначення струмів у стінках підземних трубопроводів, що дало можливість підвищити точність результатів безконтактного визначення вказаних струмів.

5. Розроблена і експериментально підтверджена можливість безконтактного визначення струмів у стінках підземних трубопроводів з отриманням умовних і розв'язком нормальних рівнянь з використанням надлишкової кількості даних про горизонтальну складову напруженості магнітного поля, що дало можливість підвищити точність результатів безконтактного визначення вказаних струмів.

6. Розроблена і виготовлена система безконтактного визначення струмів в стінках підземних трубопроводів, яка дає можливість реалізувати кожен із запропонованих способів визначення струмів.

7. Розроблена методика і здійснений метрологічний аналіз розробленої системи, в результаті чого оцінені методичні і інструментальні похибки, що дає можливість вибирати відповідний із розроблених способів визначення струмів для оцінки ізоляційного покриття одного чи двох трубопроводів. Встановлено, що відносна похибка розробленої системи при визначенні струмів в стінках підземних трубопроводів для одного трубопроводу при однократному вимірюванні буде не більшою 4,5%, з використанням нейронної мережі – не більше 2,7%, з використанням умовних і нормальних рівнянь – не більше 1,9%, а для двох трубопроводів з використанням нейронної мережі – не більше 4,2%, з використанням умовних і нормальних рівнянь 5,5%.

8. Розроблена установка для експериментальних досліджень різних систем і приладів для безконтактного визначення струмів в стінках підземних трубопроводів, яка дозволяє експериментально досліджувати такі системи і прилади для контролю ізоляційного покриття одного і двох підземних трубопроводів.

9. Проведені промислові випробування розробленої системи безконтактного визначення струмів у стінках підземних трубопроводів в НГВУ „Надвірнанафтогаз”, в УМГ „Прикарпаттрансгаз” (КС „Богородчани”), а також польові їх випробування на спеціальному полігоні Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. Результати цих випробувань підтвердили передбачувані технічні характеристики розробленої

системи контролю, а також дали можливість розробити рекомендації щодо використання розроблених способів визначення струмів в стінках підземних трубопроводів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Методы контроля и измерений при защите подземных сооружений от коррозии / [Н. П. Глазов, И. В. Стрижевский, А. М. Калашникова и др.]. - М.: Недра, 1978. - 215 с.
2. Защита металлических сооружений от подземной коррозии: Справочник / [И. В. Стрижевский, А. М. Зиневич, К. К. Никольский и др.]. - М.: Недра, 1981.-293 с.
3. Электрохимическая защита трубопроводов то коррозии / [В. Н. Остапенко, Л. Н. Ягупольская, В. В. Лукович и др.]. - Киев: Наук, думка, 1988. - 192 с.
4. Джала Р. М. Електромагнітні обстеження і контроль корозії трубопроводів / Р. М. Джала // 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.
5. Джала Р. М. Дослідження магнітного поля паралельних трубопроводів збуджених струмами низької частоти / Р. М. Джала, Л. Я. Мізюк, О. П. Максименко, О. І. Сенюк // Методи і прилади контролю якості. - 1999. - №4. - С. 3-6.
6. Магистральные трубопроводы: СНиП 2.05.06-85 . – [Дествует от 1986-01-01]. – М: ГУП ЦПП, 1985.- 87 с.
7. Трубопроводы сталеві магістральні. Загальні вимоги до захисту від корозії: ДСТУ 4219-2003. – [Чинний від 2003-12-01]. – Київ: Держспоживстандарт України, 2003.- 68 с.
8. Джала Р. М. Пошук і обстеження підземних трубопроводів / Р.М. Джала, Б.Я. Вербенець // Ринок інсталяцій.-2001.-№10.-С. 10-11.
9. Яковлев Н. И. Бесконтактные электроизмерительные приборы. / Яковлев Н. И. – Л.: Энергоатомиздат, 1990.- 256 с.
10. Гарнетт Э. Ф. Электронные устройства для локации заглубленных

газопроводов / Э. Ф. Гарнетт // Нефть газ и нефтехимия за рубежом.- №5.- 1983.-С. 85-86.

11. Pat. 4390836 USA. G01R31/00. Method and apparatus for the detection of pipeline holidays / Charles R. B., Irvin D. J.; Marathon Oil Company, Findlay, Ohio.- 20060101; Filled August 11, 1980; Published June 28, 1983.

12. Гордиенко В. И. Электромагнитное обнаружение инженерных коммуникаций и локальных аномалий / Гордиенко В. И., Убогий В. П., Ярошевский Е. В. – Киев: Наук.думка, 1981. – 227 с.

13. Разин Г. И. Бесконтактное измерение электрических токов / Г. И. Разин , А. П. Щелкин. – М.: Атомиздат, 1974. – 160 с.

14. Средства измерений параметров магнитного поля / [Афанасьев Ю. В., Хорев В. Н., Шифрин В. Я. и др.] – Л.: Энергия, 1979. – 320 с.

15. А.с. 78768 СССР, МКИ³ G01R19/00. Устройство для бесконтактного измерения токов в подземных магистральных газопроводах / Г. К. Ягола, К. К. Григорович (СССР). - № 3360076/25-08; Заявлено 27.03.78; Опубл. 07.12.80, Бюл. №45.

16. А.с. 940077 СССР, МКИ 3 G01R19/00. Устройство для безконтактного измерения электрических сигналов/ Н. И. Яковлев (СССР). - № 3150123/25-08; Заявлено 26.12.80; Опубл. 30.06.82, Бюл. №24.

17. Пат. 25113 Украина. G01R31/02. Пристрій для безконтактного виявлення і обстеження прихованих струмопроводів / Мізюк Л. Я., Дуб П. Б.; заявник і патентовласник фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка - №199617485; заявл. 29.11.96; опубл. 25.12.1998, Бюл. №6.

18. Dzhala R. M. Method of contactless currents measurement in diagnostics of pipelines corrosion / R. M. Dzhala // 2-nd Int. Conf. "Pipeline Inspection". - M.: MSIA -Spectrum", 1991. - P. 227-280.

19. Barnes P. R. The magnetically inferred current attenuation method for pipeline coating evaluation / P. R. Barnes // Ibid. P. 538-545.

20. А.с. 1471138 СССР. МКИ⁴ G01R19/00, 33/02. Бесконтактный измеритель тока в трубопроводе / Р. М. Джала. Б. Я. Вербенец (СССР). - № 2393719/25-08; Заявлено 16.03.88; Опубл. 07.04.89, Бюл. №13.

21. 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.

22. Пат. 250 Україна, МКВ⁵ G01R19/00. Безконтактний вимірювач струму в трубопроводі / Джала Р. М., Вербенець Б. Я. - опубл. 1993, Бюл. №1

23. Джала Р. М. Метод безконтактних вимірювань струмів для контролю протикорозійного захисту підземних трубопроводів / Р. М. Джала // Фіз.-хім. механіка матеріалів. - 1999. - №3. – С. 105-112.

24. Мизюк Л. Я. Аппаратура електромагнитних обстежуваних магістральних трубопроводов БИТ-3 / Л. Я. Мизюк, Р. М. Джала // Розробки Львов. МВНПМК: Каталог. -Львов: ЗНЦ АН УРСР, 1989.-С. 157-158.

25. Сидоров Б.В. Применение системы С–Scan при обследовании состояния изоляционного покрытия / Б. В. Сидоров , В.В. Харионовский // Газовая промышленность.-1993.-№6.- С.18-20.

26. Методика оценки фактического положения и состояния подземных трубопроводов: ВРД 39-1.10-026-2001. – [Действительный от 2001-01-29] . – М.: ВНИИГАЗ, 2001, - 62с.

27. Джала Р. М. Електродинамічна модель паралельних ізольованих трубопроводів / Р. М. Джала // Радіоелектроніка та телекомунікації: Вісник ДУ “Львівська політехніка” – 2000. – №387, С. 474-479.

28. Джала Р.М. Вплив паралельного струмопроводу на визначення струму підземного трубопроводу / Р. М. Джала, О. І. Сенюк // Відбір і обробка інформації. – 1997. – Вип. 11(87). – С 11-14.

29. Указания по контролю качества изоляционных покрытий при строительстве: ВСН 1-58-74. – [Действительный от 1974-03-23] . – М.: ВНИИСТ, 1975, - 52с.

30. Инструкция по контролю качества строительства, техническому надзору при производстве работ и сооружений ЭХЗ на магистральных нефтепроводах: ВСН 150-82. – [Действительный от 1982-04-15]. – М.: ВНИИСТ, 1982, - 125с.

31. Система газопостачання газопроводи підземні сталеві. Загальні вимоги до захисту від корозії: ДСТУ Б В.2.5-29:2006. – [Чинний від 2007-06-

01]. – Київ: Мінбуд України, 2006.- 119 с.

32. Инструкция по диагностированию технического состояния подземных стальных газопроводов: РД 12-411-01. – [Действительный от 2001-09-15]. – М.: НТЦ "Промышленная безопасность", 2002, - 79с.

33. Мизюк Л. Я. Входные преобразователи для измерения напряженности низкочастотных магнитных полей. / Мизюк Л. Я. – К.: Наук. думка, 1964. – 227 с.

34. Искатель повреждений изоляции газопроводов ИПИТ-2: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://kvazar-ufa.com/?part_id=338&goods_id=322.

35. Апаратура нахождения повреждения изоляции АНПИ-А: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.kvazar-ufa.com/?part_id=335&goods_id=23.

36. Искатель повреждений Универсал-911: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.kvarz-el.com/index.php?id=108>.

37. Связьприбор. Спецификации продукции: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.svpribor.ru/catalog.php>.

38. C-SCAN модель 2010 Спецификация: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dynalog.co.uk/russian/russian.htm>.

39. Джала Р. М. Контроль захисту від корозії підземних трубопроводів апаратурою БІТ-КВП з комп'ютерною обробкою результатів / Р. М. Джала, Б. Я. Вербенець, О. І. Сенюк // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів.-Київ-Львів: ФМІ НАНУ. - 1999. - С. 102-103.

40. Джала Р. М. Апаратура БІТ-КВП з комп'ютерною обробкою результатів обстежень підземних комунікацій / Р. М. Джала, Б. Я. Вербенець, О. І. Сенюк // Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика: Вісник Національного університету "Львівська політехніка". - 2001. -№415. - С. 100-104.

41. The Theory of PCM: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.radiodetection.com/Document_links_det.asp?id=5814&sec_id=2726.

42. Яворський А. В. Особливості контролю ізоляційного покриття

підземних нафтогазопроводів за допомогою пристрою БКІТ-2 / А. В. Яворський // Методи і прилади контролю якості. - 2003. - №11 – С. 47-50.

43. Яворський А. В. Безконтактний контроль стану ізоляційного покриття гальванічно з'єднаних паралельних промислових нафтогазопроводів / А. В. Яворський, І. С. Кісіль // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. -2004. -№3. - С. 36-41.

44. Яворський А.В. Розробка методу та системи для безконтактного контролю стану ізоляції промислових нафтогазопроводів : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. тех. наук: спец 05.11.13 «Прилади і методи контролю та визначення складу речовин» / Яворський Андрій Вікторович ; Івано-Франківський нац. техн. ун-т нафти і газу.-Івано-Франківськ, 2005.-22с.

45. Яворський А. В. Інформаційно-вимірювальна система БКІТ-2 для безконтактного контролю ізоляції підземних гальванічно з'єднаних паралельних нафтогазопроводів / А. В. Яворський, І. С. Кісіль // Нафтова і газова промисловість. -2005. -№2. - С. 42-43.

46. Pat. 5093622 USA. G01V 3/11. Method and Apparatus for determining direction to and position of an underground conductor / William D. Balkman; Minnesota Mining and Manufacturing Company (St. Paul, MN) .- 20060101; Filled March 17, 1989; Published March 3, 1992.

47. Pat. 4542344 USA. G01V 3/11. Detecting buried pipeline depth and location with electromagnetic triangulation / Glenn T. Darilek, Edward H. Cooper, Jr.; Corrosion Logging Service International (Lafayette, LA), Texas Gas Development Corporation (Owensboro, KY).- 20060101; Filled September 2, 1983; Published September 17, 1985.

48. Максименко О.П. Безконтактне вимірювання координат і струмів інженерних комунікацій : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. тех. наук: спец 05.11.05 «Прилади і методи вимірювання електричних та магнітних величин» / Максименко Олександр Парфенович; Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка. - Львів, 1998.-17с.

49. Пат. 88698 Україна. G01V 3/00. Спосіб визначення глибини і напрямку проходження підземного трубопроводу / Костів Б.В., Кісіль І.С.; заявник і патентовласник Івано-Франківський національний технічний

університет нафти і газу - №200714314; заявл. 19.12.07; опубл. 10.11.2009, Бюл. №21.

50. Трифонов А.Г. Постановка задачи оптимизации и численные методы ее решения: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://matlab.exponenta.ru/optimiz/book_2/.

51. 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 і прилади контролю якості. – 2005. – №14. – С.70-73.

52. Костів Б.В. Вимірювання напруженості магнітного поля над паралельними підземними нафтогазопроводами з метою безконтактного контролю їх ізоляції / Б.В. Костів, І.С. Кісіль // Методи та прилади контролю якості. - 2007. – №17. – С.37-40.

53. Костів Б.В. Оцінка стану ізоляційного покриття підземних нафтогазопроводів на основі аналізу профілю напруженості магнітного поля над ними / Б.В. Костів, І.С. Кісіль, Р.Т. Боднар // Методи та прилади контролю якості. - 2007. - №18. - С.17-21.

54. Вычисления и приближение данных в MATLAB – Математика: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru/spline/index.php>.

55. Круглов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. / В.В. Круглов, В.В. Борисов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2002. – 382с.

56. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс, 2-е издание / Хайкин С.; [пер. с англ. Н.Н. Куссуль, А.Ю. Шелестова]. - М. : Издательский дом "Вильямс", 2006. — 1104 с.

57. Костів Б.В. Підвищення точності контролю ізоляційного покриття підземних трубопроводів / Б.В. Костів, І.С. Кісіль // Збірник доповідей 6-ї Національної технічної конференції «Неруйнівний контроль та технічна діагностика – UkrNDT-2009», 9-12 червня 2009р., м. Київ, УТ НКТД, 2009. – С. 316-318.

58. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / Осовский С.; [пер. с польского И.Д. Рудинского]. – М.: Финансы и статистика,

2002. – 344с.

59. Барский А. Б. Нейронные сети: распознавание, управление, принятие решений / Барский А. Б. — М.: Финансы и статистика, 2004. — 176 с.

60. Каллан Р. Основные концепции нейронных сетей. / Каллан Р.; [пер. с англ А.Г. Сивака]. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2001. – 287с.

61. Кісіль І.С. Метрологія, точність і надійність засобів вимірювань: Навч. посібник. / Кісіль І.С. – Івано-Франківськ: видавництво «Факел», 2002. – 400с.

62. Костів Б.В. Вдосконалення системи магнітних антен для безконтактного визначення струму в стінках підземного трубопроводу в процесі контролю його ізоляції / Б.В. Костів, І.С. Кісіль // Методи та прилади контролю якості. - 2007. – № 19. – С. 31-34.

63. Кісіль І.С. Методика обробки результатів багатократних спостережень напруженості магнітного поля при безконтактному визначенні параметрів підземних нафтогазопроводів / І.С. Кісіль, Б.В. Костів // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Прилади та методи неруйнівного контролю. - Харків: НТУ «ХПІ» - № 14 . - 2009. - С. 11-19.

64. Костів Б.В. Пристрій для контролю стану ізоляційного покриття підземних трубопроводів / Б.В. Костів, І.С. Кісіль // Матеріали 14-ої міжнародної науково-технічної конференції "Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів", 16-21 лютого 2009р., м.Славське, 2009. – С. 61-62.

65. Костів Б.В. Застосування штучних нейронних мереж для обробки результатів безконтактного контролю стану ізоляційного покриття підземних трубопроводів / Б.В. Костів // Збірник матеріалів доповідей XXI відкритої науково-технічної конференції молодих науковців і спеціалістів Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України «КМН-2009», М.Львів, ФМІ ім. Г.В. Карпенка, 2009р. – С 300-303.

66. Яворський А. В. Контроль ізоляційного покриття підземних трубопроводів в умовах значних промислових електромагнітних завад / А. В. Яворський , І. С. Кісіль // Методи і прилади контролю якості.- 2003. -

№10 – С. 15-19.

67. Яворський А. В. Побудова завадостійкої системи безконтактного контролю ізоляції підземних трубопроводів / А. В. Яворський, І. С. Кісіль // Одинадцята міжнародної наук.-техн. конф. “Сучасні методи і засоби неруйнуючого контролю і технічної діагностики”, Ялта, 2003.-С.171.

68. Костів Б.В. Контроль стану ізоляційного покриття підземних нафтогазопроводів / Б.В. Костів, І.С. Кісіль // Збірник тез доповідей п'ятої науково-технічної конференції «Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтопромислового обладнання», 2-5 грудня 2008р., м. Івано-Франківськ, С.120-122.

69. Microchip Advanced Part Selector: [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.microchip.com/maps/main.aspx>.

70. Хоровиц П. Искусство схемотехники / П. Хоровиц, У. Хилл. – М.: Мир. – 1998. –704 с.

71. Neil P. The Instrumentation Amplifier Handbook. Draft Copy / Neil P. - Burr- Brown Corporation, Tucson, Arizona. – 2009. – 116р.

72. Micropower, Single-Supply, Rail-to-Rail, Precision Instrumentation Amplifiers: [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/MAX4194-MAX4197.pdf>.

73. Мошиц Г. Проектирование активных фильтров: Пер. с англ. / Г. Мошиц, П. Хорн. — М.: Мир, 1984. — 320 с.

74. Джонсон Д. Справочник по активным фильтрам / Д. Джонсон, Дж. Джонсон, Г. Мур. — М: Энергоатомиздат, 1983. — 128 с.

75. MAX260, MAX261, MAX262 Microprocessor Programmable Universal Active Filters: [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.maxim-ic.com/quick_view2.cfm/qv_pk/1488.

76. Яценков В.С. Микроконтроллеры Microchip. Практическое руководство / Яценков В.С. – М.: Горячая линия – Телеком., 2002. – 296 с.

77. Программирование на языке С для AVR и PIC мкроконтроллеров / [Сост. Ю.А. Шпак]. – К.: «МК-Пресс», 2006. – 400 с.

78. Джесс Либерти Программирование на С# / Джесс Либерти. – М.:

Символ-Плюс., 2003. – 688 с.

79. Климов А.П. Программирование КПК и смартфонов на .Net Compact Framework/ Климов А.П. – СПб.: Питер, 2007. – 320 с.

80. Микитин Г.В. Основи метрології. Навч. Посібник / Микитин Г.В. – Львів: СПОЛОМ, 2008. – 296с.

81. Грановский В.А. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях / В.А. Грановский, Г.Н. Сирая. – Л.: Энергоатомиздат, 1980. – 288с.

82. Деньгуб В.М. Единицы величин: Словарь-справочник / В.М. Деньгуб, В.Г. Смирнов.- М.: Изд-во стандартов, 1980. – 240с.

83. Зимельман М.А. Метрологические основы технических измерений / Зимельман М.А. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 256с.

84. Полішко С.П. Точність засобів вимірювань: Навч. Посібник / С.П. Полішко , О.Д. Трубенюк. – К.: Вища школа, 1992. – 173 с.

85. Шишкин И.Ф. Теоретическая метрология: Учебник для вузов / Шишкин И.Ф. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 492с.

86. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю / [Володарський Є.Т., Кухарчук В.В., Поджаренко В.О., Середюк Г.В.]. – Вінниця: Велес, 2001. – 219 с.

87. Орнатский П. П. Теоретические основы информационно – измерительной техники / Орнатский П. П. – Киев: Вища школа, 1983. – 455с.

88. Рего К.Г. Метрологическая обработка технических измерений: Справ. Пособие / Рего К.Г. – К.: Техніка, 1987. – 128 с.

89. Бичківський Р.В. Метрологія, стандартизація, управління якістю і сертифікація / Бичківський Р.В., Столярчук П.Г., Гамула П.Р.; – Львів: Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2004. – 560с.

ДОДАТКИ

Додаток А

Моделювання роботи способу визначення профілю горизонтальної складової
напруженості магнітного поля за даними із трьох магнітних антен

```

%% Генерація даних із завадами
clc;
clear;
error = 0.07;

step = 0.01; length_prof = 3+1*rand();
y = 0:step:length_prof;
I = 0.1+2*rand(); z=0.3+1.5*rand(); d=1.5+0.5*rand(); b = 0.25;
H1 = (I*z)/((z^2+(y-d).^2)*2*pi);
H2 = (I*z)/((z^2+(y-d+b).^2)*2*pi);
H3 = (I*z)/((z^2+(y-d+b+b).^2)*2*pi);

H10=H1;
H20=H2;
H30=H3;

H1 = H1 + max(H1) .* ((rand(1,length(H3))-0.5).*error);
H2 = H2 + max(H2) .* ((rand(1,length(H2))-0.5).*error);
H3 = H3 + max(H3) .* ((rand(1,length(H1))-0.5).*error);

figure
plot(H1)
hold on
plot(H2)
hold on
plot(H3)
xlabel('n')
ylabel('Hy, A/м')
title('Емодельований сигнал із доданими завадами')

%% сплайнова інтерполяція
tol=0.0001;
k=6

x=(0:1:(length(H1)-1));

H1s = csaps(x,H1,tol);
H2s = csaps(x,H2,tol);
H3s = csaps(x,H3,tol);

figure
fnplt(H1s,2)
hold on
plot(H1)
hold on
fnplt(H2s,2)
hold on
plot(H2)
hold on
fnplt(H3s,2)

```

Додаток А

(продовж. 1)

```

hold on
plot(H3)
hold on
xlabel('n')
ylabel('Hy, А/м')
title('Результат сплайнової апроксимації')

diff (fnval (fnder(H1s),[0 (length(H1)-1)]))
diff (fnval (fnder(H2s),[0 (length(H1)-1)]))
diff (fnval (fnder(H3s),[0 (length(H1)-1)]))
**
figure
fnplt(H1s,2)
hold on
plot(H10)
hold on
fnplt(H2s,2)
hold on
plot(H20)
hold on
fnplt(H3s,2)
hold on
plot(H30)
hold on

** відновлення функції по сплайн - інтерполяції.
%обмеження діапазону визначення профілю
interval = 10; %відсотків
ind_s = round(length(H1)/10); %початковий індекс
ind_e = round(length(H1)-length(H1)/10); %кінцевий індекс
%допуск для знаходження профілю
dopusk = 0.02;
dopusk_l = 1-dopusk;
dopusk_h = 1+dopusk;

profile(1)=fnval(H1s,ind_s);
profile(2)=fnval(H2s,ind_s);
profile(3)=fnval(H3s,ind_s);

end_cond = false;
ind = ind_s;
k=3;

flag_overflow = false;
while (end_cond == false)
    flag_low = false;
    flag_hi = false;

    if (flag_overflow == true)
        ans = 'Переповнення лічильника'
        break;
    end
    for i=1:0.01:100
        chk1 = fnval(H1s,ind+i);
        chk2 = fnval(H2s,ind+i);

```

Додаток А

(продовж. 2)

```

    if (ind+i>ind_e)
        end_cond = true;
        break;
    end

    if ( (chk1 > profile(k-1)*dopusk_l) & (chk1 < profile(k-1)*dopusk_h) &
        (chk2 > profile(k)*dopusk_l) & (chk2 < profile(k)*dopusk_h) )
        if (flag_low == false)
            i_low = i;
            flag_low = true;
        end
    else
        if (flag_low == true)
            i_hi = i-0.01;
            flag_hi = true;
        end
    end

    if ((flag_low == true) & (flag_hi == true))
        k=k+1;
        profile(k) = fnval(H3s,ind+(i_low+i_hi)/2) ;
        ind = ind + 1 + round((i_low+i_hi)/2);
        flag_low = false;
        flag_hi = false;
        break;
    end

    if (i==99.99)
        break
        flag_overflow = true;
    end

end

end

figure
x=0:b:b*(length(profile)-1);
x=x+step*ind_s;
plot (x,profile,'x')
hold on
plot (y,H10)
xlabel('x, м')
ylabel('Hy, А/м')
title('Вихідний профіль напруженості магнітного поля та обчислені точки')
** похибка точок профілю

Hch = (I*z)/((z^2+(x-d).^2)*2*pi);
Vidn_poch = abs(profile-Hch)*100/Hch;
max(Vidn_poch)

```

Додаток Б

Програма визначення профілю горизонтальної складової напруженості
магнітного поля за даними із трьох магнітних антен

```

clc;
clear;

load 'new_data.mat'

nb_prof=2;

Dosl_data=OriginalProf35;

H2 = Dosl_data(:,1);
H3 = Dosl_data(:,2);
H1 = Dosl_data(:,3);

figure
plot(H1)
xlabel('n')
ylabel('Hy, A/m')
title('Сигнал з магнітних антен')
hold on
plot(H2)
hold on
plot(H3)

%% сплайнова апроксимація
tol=0.01;
k=6

x=(0:1:(length(H1)-1));
H1s = csaps(x,H1s)
H1s = csaps(x,H1,tol);
H2s = csaps(x,H2,tol);
H3s = csaps(x,H3,tol);

figure
fnplt(H1s,2)

xlabel('n')
ylabel('Hy, A/m')
title('Результат апроксимації сигналу')

hold on
plot(H1)
hold on
fnplt(H2s,2)
hold on
plot(H2)
hold on
fnplt(H3s,2)
hold on

```

Додаток Б

(продовж. 1)

```

plot(H3)
hold on

%% відновлення функції по сплайн - інтерполяції
%% обмеження діапазону визначення профілю
interval = 20; %відсотків
ind_s = round(length(H1)/100 * interval); %початковий індекс
ind_e = round(length(H1)-length(H1)/100 * interval); %кінцевий індекс
%допуск для знаходження профілю
dopusk = 0.05;
dopusk_l = 1-dopusk;
dopusk_h = 1+dopusk;

profile(1)=fnval(H1s,ind_s);
profile(2)=fnval(H2s,ind_s);
profile(3)=fnval(H3s,ind_s);

end_cond = false;
ind = ind_s;
k=3;

flag_overflow = false;
while (end_cond == false)
    flag_low = false;
    flag_hi = false;

    if (flag_overflow == true)
        ans = 'Переповнення лічильника';
        break;
    end

    for i=1:0.01:100
        chk1 = fnval(H1s,ind+i);
        chk2 = fnval(H2s,ind+i);

        if (ind+i>ind_e)
            end_cond = true;
            break;
        end

        if ( (chk1 > profile(k-1)*dopusk_l) & (chk1 < profile(k-1)*dopusk_h) &
(chk2 > profile(k)*dopusk_l) & (chk2 < profile(k)*dopusk_h) )
            if (flag_low == false)
                i_low = i;
                flag_low = true;
            end
        else
            if (flag_low == true)
                i_hi = i-0.01;
            end
        end
    end
end

```

Додаток Б

(продовж. 2)

```

        flag_hi = true;
    end
end

    if ((flag_low == true) & (flag_hi == true))
        k=k+1;
        profile(k) = fnval(H3s,ind+(i_low+i_hi)/2) ;
        ind = ind + round((i_low+i_hi)/2);
        flag_low = false;
        flag_hi = false;
        break;
    end

    if (i==99.99)
        break
        flag_overflow = true;
    end

end
end

b=0.25

figure
x=0:b:b*(length(profile)-1);
plot (x,profile, '-o')

xlabel('x, м')
ylabel('Hy, А/м')
title('Профіль напруженості магнітного поля')

%%
n=length(profile)
Hy=profile'
y=0:0.25:(0.25*(n-1))
[I, z, d] = NormUmovn( Hy , y' ,n)

%%
if (nb_prof == 1)
prof_fine01 = profile(:);
save ('kinc_dani.mat', 'prof_fine01');
else
prof_fine35 = profile(:);
save ('kinc_dani.mat', 'prof_fine35', '--append');
end

```

Додаток В

Програма для генерування і навчання штучної нейронної мережі для визначення струму в стінці одного трубопроводі

```

clc;
clear;
[ NiData, NoData, DataGen ] = GenerateData(2000, 1000, 15, 8, 10, 0, 0.05, 2,
0.5, 3, 2, 5, 0, 0, 0, 0, 0);

%%
[NiData_n, Ni_S] = mapminmax(NiData);
[NoData_n, No_S] = mapminmax(NoData);
%%
net=newff(minmax(NiData_n), [25, 15, 3], {'logsig' 'logsig'
'purelin'}, 'trainlm');
net.performFcn='sse';
net.trainParam.goal=1e-3;
net.trainParam.epochs=10000;
[net, tr]=train(net, NiData_n, NoData_n);
save ltr_net_final net;
param = [Ni_S No_S];
save ltr_param_final param;
%%
load ltr_net_final net;
load ltr_param_final param;
[ NiData, NoData, DataGen ] = GenerateData(400, 300, 15, 8, 10, 0, 0.05, 2,
0.5, 3, 2, 5, 1, 2, 4, 5, 8);
NiData_n = mapminmax('apply', NiData, Ni_S);
NoData_n = mapminmax('apply', NoData, No_S);
net.performFcn='sse';
net.trainParam.goal=1e-2;
net.trainParam.epochs=10000;
[net, tr]=train(net, NiData_n, NoData_n);
save ltr_net_final_noise net;
%%
load ltr_net_final_noise net;
load ltr_param_final param;
[ NiData, NoData, DataGen ] = GenerateData(600, 300, 15, 8, 10, 0, 0.05, 2,
0.5, 3, 2, 5, 0, 0, 0, 0, 0);
NiData_n = mapminmax('apply', NiData, Ni_S);
NoData_n = mapminmax('apply', NoData, No_S);
net.performFcn='sse';
net.trainParam.goal=1e-4;
net.trainParam.epochs=10000;
[net, tr]=train(net, NiData_n, NoData_n);
save ltr_net_final_noise_upd net;
%%
[ NiData, NoData, DataGen ] = GenerateData(100, 50, 15, 8, 10, 0, 0.05, 2, 0.5,
3, 2, 5, 1, 2, 4, 5, 8);
NiData_n_new = mapminmax('apply', NiData, Ni_S);
yn=sim(net, NiData_n_new);
y = mapminmax('reverse', yn , No_S);
for i=1:3
    figure(i);
    [m(i), b(i), r(i)]=postreg(y(i,:), NoData(i,:));
end

```

Додаток Д

Програма для генерування і навчання штучної нейронної мережі для визначення струмів у стінках двох трубопроводів

```

clc;
clear;
%GenerateData(ncdata, nerr, npoint, lymax, lymax, dy, lmin, lmax, zmin, zmax,
%dmin, dmax, bmin, bmax, ErrLev1, ErrLev2, ErrLev3, ErrLev4, ErrLev5)
%генерація даних для неромережі
[ NiData, NoData, DataGen ] = GenerateData2tHyHx(2000, 1000, 15, 15, 0, 0.08,
1.5, 0.8, 3, 2, 6, 1, 5 , 0, 1, 2, 4, 5);

%% нормування даних від -1 до 1
[NiData_n, Ni_S] = mapminmax(NiData);
[NoData_n, No_S] = mapminmax(NoData);

%т провідження даних
[NiData_n_trans, Ni_PCA] = processpca(NiData_n, 0.001);

%%
NiData_n_trans = NiData_n;
net=newff(minmax(NiData_n), [25, 15, 6], {'logsig' 'logsig'
'purelin'}, 'trainlm');
net.performFcn='sse';
net.trainParam.goal=0.0001;
net.trainParam.epochs=10000;
[net, tr]=train(net, NiData_n_trans , NoData_n);
save 2tr_net_final_trans net;

yn = sim(net, NiData_n_trans);
a = mapminmax('reverse', yn, No_S);
for i=1:4
    figure(i);
    [m(i), b(i), r(i)] = postreg(a(i,:), NoData(i,:));
end

%%
[ NiData, NoData, DataGen ] = GenerateData2tHyHx(1000, 100, 15, 15, 0, 0.08,
1.5, 0.8, 3, 2, 6, 1, 5 , 0, 0, 0, 0, 0);
NiData_n_trans = mapminmax('apply', NiData, Ni_S);
NoData_n = mapminmax('apply', NoData, No_S);
net.trainParam.goal=1e-2;
[net, tr]=train(net, NiData_n_trans , NoData_n);
save 2tr_net_final_MD net;

yn = sim(net, NiData_n_trans);
a = mapminmax('reverse', yn, No_S);
for i=1:4
    figure(i);
    [m(i), b(i), r(i)] = postreg(a(i,:), NoData(i,:));
end
%%
[ NiData, NoData, DataGen ] = GenerateData2tHyHx(300, 100, 15, 15, 0, 0.08,
1.5, 0.8, 3, 2, 6, 1, 5 , 0, 0, 0, 0, 0);

```

Додаток Д

(продовж. 1)

```

NiData_n_new = mapminmax('apply',NiData, Ni_S);

* NiData_n_new_trans = processpca('apply',NiData_n_new , Ni_PCA);
NiData_n_new_trans = NiData_n_new;

* load 2tr_net_final_trans net;

yn=sim(net, NiData_n_new_trans);

y = mapminmax('reverse', yn , No_S);

for i=1:4
    figure(i);
    [m(i),b(i),r(i)]=postreg(y(i,:),NoData(i,:));
end
%%
clc;
clear;
load ltr_net_final_noise_upd net;
load ltr_param_final param;
Ni_S = param(1,1);
No_S = param(1,2);

%%
NoData_n=sim(net, NiData_n);
NoData_net = mapminmax('reverse', NoData_n , No_S);

DataGen=DataGen';
NoData_net=NoData_net';

Res = DataGen;
Res(:,9:13) = NoData_net(:,:);
Res(:,14) = (abs(Res(:,1))-Res(:,9))./Res(:,1)).*100;
Res(:,15) = (abs(Res(:,2))-Res(:,10))./Res(:,2)).*100;
Res(:,16) = (abs(Res(:,3))-Res(:,11))./Res(:,3)).*100;
Res(:,17) = (abs(Res(:,4))-Res(:,12))./Res(:,4)).*100;
Res(:,18) = (abs(Res(:,5))-Res(:,13))./Res(:,5)).*100;

max_poh = max(Res(:,14:18))
%%

[ NiData, NoData, DataGen ] = GenerateData2tHyHx(70, 50, 15, 9, 12, 0, 0.05, 2,
0.5, 3, 1, 3, 1, 5 , 1, 2, 3, 5, 8);
NiData_n = mapminmax('apply',NiData, Ni_S);
NoData_n=sim(net, NiData_n);
NoData_net = mapminmax('reverse', NoData_n , No_S);
DataGen=DataGen';
NoData_net=NoData_net';
Res = DataGen;
Res(:,9:13) = NoData_net(:,:);
Res(:,14) = (abs(Res(:,1))-Res(:,9))./Res(:,1)).*100;
Res(:,15) = (abs(Res(:,2))-Res(:,10))./Res(:,2)).*100;
Res(:,16) = (abs(Res(:,3))-Res(:,11))./Res(:,3)).*100;
Res(:,17) = (abs(Res(:,4))-Res(:,12))./Res(:,4)).*100;
Res(:,18) = (abs(Res(:,5))-Res(:,13))./Res(:,5)).*100;
max_poh = max(Res(:,14:18))

```

Додаток Е

Програма для числового моделювання методики умовно-нормальних рівнянь
для визначення струму в стінці одного трубопроводу

```

clc
clear
%d      %vidstan' vid pochatku sposterezhen do osi truby
l=8     %dovzhyna profilyu ,m
n=33    %kilkist' tochk profilu

format long

Result=zeros(70,13)
Result(1:10,4)=0
Result(11:20,4)=2
Result(21:30,4)=5
Result(31:40,4)=10
Result(41:50,4)=15
Result(51:60,4)=20
Result(61:70,4)=30

for k=1:70
    I=0.01 + rand*0.99;      %I=0.01-1
    z=0.5 + rand*3;         %z=0.5-3.5
    d=2 + rand*4;           %d=2-6

    Result(k,1)=I;
    Result(k,2)=z;
    Result(k,3)=d;

    [Hy,y] = ProfileHy( I, z, d, l, n, Result(k,4));
    [Id, zd, dd] = NormUmovn( Hy , y ,n);

    Result(k,5)=Id;
    Result(k,6)=zd;
    Result(k,7)=dd;

    Result(k,8)=abs(I-Id);
    Result(k,9)=abs(z-zd);
    Result(k,10)=abs(d-dd);

    Result(k,11)=abs(I-Id)*100/I;
    Result(k,12)=abs(z-zd)*100/z;
    Result(k,13)=abs(d-dd)*100/d;
end

function [ I, z, d ] = NormUmovn( Hy , y ,n)
%NORMUMOVN Summary of this function goes here
% Detailed explanation goes here

```

Додаток Е
(продовж. 1)

```
A=zeros(n,3);
Cv=zeros(n,1);

A(:,1)=1;
A(:,2)=-2*pi.*Hy;
A(:,3)=4*pi.*y.*Hy;
Cv(:,1)=2*pi.*Hy.*y.^2;

B=[ sum(A(:,1).^2)      sum(A(:,1).*A(:,2)) sum(A(:,1).*A(:,3));
    sum(A(:,2).*A(:,1)) sum(A(:,2).^2)      sum(A(:,2).*A(:,3));
    sum(A(:,3).*A(:,1)) sum(A(:,3).*A(:,2)) sum(A(:,3).^2)      ];

C=[ sum(Cv(:,1).*A(:,1));
    sum(Cv(:,1).*A(:,2));
    sum(Cv(:,1).*A(:,3))];

Xr=B\C;

d=Xr(3);
z=sqrt(Xr(2)-d^2);
I=Xr(1)/z;
```

Додаток Ж

Програма для числового моделювання методики умовно-нормальних рівнянь
для визначення струмів у стінках двох трубопроводів

```

clc
clear
%d      %відстан' від початку спостережен до осі труби
l=10    %довжина профілю ,m
n=41    %кількост' точок профілю

format long;

Result=zeros(135,20);
tvar = 0;
Result((tvar+1):(tvar+5),7)=real(0); Result((tvar+1):(tvar+5),8)='u';
Result((tvar+6):(tvar+10),7)=real(0); Result((tvar+6):(tvar+10),8)='c';
Result((tvar+11):(tvar+15),7)=real(0); Result((tvar+11):(tvar+15),8)='d';

tvar = 15;
Result((tvar+1):(tvar+5),7)=1; Result((tvar+1):(tvar+5),8)='u';
Result((tvar+6):(tvar+10),7)=1; Result((tvar+6):(tvar+10),8)='c';
Result((tvar+11):(tvar+15),7)=1; Result((tvar+11):(tvar+15),8)='d';

tvar = 30;
Result((tvar+1):(tvar+5),7)=2; Result((tvar+1):(tvar+5),8)='u';
Result((tvar+6):(tvar+10),7)=2; Result((tvar+6):(tvar+10),8)='c';
Result((tvar+11):(tvar+15),7)=2; Result((tvar+11):(tvar+15),8)='d';

tvar = 45;
Result((tvar+1):(tvar+5),7)=3; Result((tvar+1):(tvar+5),8)='u';
Result((tvar+6):(tvar+10),7)=3; Result((tvar+6):(tvar+10),8)='c';
Result((tvar+11):(tvar+15),7)=3; Result((tvar+11):(tvar+15),8)='d';

tvar = 60;
Result((tvar+1):(tvar+5),7)=5; Result((tvar+1):(tvar+5),8)='u';
Result((tvar+6):(tvar+10),7)=5; Result((tvar+6):(tvar+10),8)='c';
Result((tvar+11):(tvar+15),7)=5; Result((tvar+11):(tvar+15),8)='d';

tvar = 75;
Result((tvar+1):(tvar+5),7)=10; Result((tvar+1):(tvar+5),8)='u';
Result((tvar+6):(tvar+10),7)=10; Result((tvar+6):(tvar+10),8)='c';
Result((tvar+11):(tvar+15),7)=10; Result((tvar+11):(tvar+15),8)='d';

tvar = 90;
Result((tvar+1):(tvar+5),7)=15; Result((tvar+1):(tvar+5),8)='u';
Result((tvar+6):(tvar+10),7)=15; Result((tvar+6):(tvar+10),8)='c';
Result((tvar+11):(tvar+15),7)=15; Result((tvar+11):(tvar+15),8)='d';

tvar = 105;
Result((tvar+1):(tvar+5),7)=20; Result((tvar+1):(tvar+5),8)='u';
Result((tvar+6):(tvar+10),7)=20; Result((tvar+6):(tvar+10),8)='c';
Result((tvar+11):(tvar+15),7)=20; Result((tvar+11):(tvar+15),8)='d';

```

Додаток Ж

(продовж. 1)

```

tvar = 120;
Result((tvar+1):(tvar+5),7)=25; Result((tvar+1):(tvar+5),8)='u';
Result((tvar+6):(tvar+10),7)=25; Result((tvar+6):(tvar+10),8)='c';
Result((tvar+11):(tvar+15),7)=25; Result((tvar+11):(tvar+15),8)='d';

for k=1:135
    I1=0.01 + rand*0.99;      %I1=0.01-1
    z1=0.5 + rand*3;         %z1=0.5-3.5
    I2=0.01 + rand*0.99;    %I2=0.01-1
    z2=0.5 + rand*3;        %z2=0.5-3.5
    d=1 + rand*3;           %d=1-4
    b=2 + rand*3;           %d=2-5

    Result(k,1)=I1;
    Result(k,2)=z1;
    Result(k,3)=I2;
    Result(k,4)=z2;
    Result(k,5)=d;
    Result(k,6)=b;

    [Hy,y] = ProfileHy2t( I1, z1, I2, z2, d, b, l, n, Result(k,7), Result(k,8)
);
    [I1d, z1d, I2d, z2d, dd, bd] = NormUmovn2t( Hy , y ,n);

    Result(k,9)=I1d;
    Result(k,10)=z1d;
    Result(k,11)=I2d;
    Result(k,12)=z2d;
    Result(k,13)=dd;
    Result(k,14)=bd;

    Result(k,15)=abs(I1-I1d)*100/I1;
    Result(k,16)=abs(z1-z1d)*100/z1;
    Result(k,17)=abs(I2-I2d)*100/I2;
    Result(k,18)=abs(z2-z2d)*100/z2;
    Result(k,19)=abs(d-dd)*100/d;
    Result(k,20)=abs(b-bd)*100/b;

end

Result=real(Result);

function [ I1, z1, I2, z2, d, b ] = NormUmovn2t( Hy , y , n )
%NORMUMOVN2T Summary of this function goes here
% Detailed explanation goes here

nb_of_eq=7;

A=zeros(n,nb_of_eq);
Cv=zeros(n,1);

A(:,1)=y.^2;

```

Додаток Ж
(продовж. 2)

```

A(:,2)=4*pi.*Hy.*(y.^3);
A(:,3)=-2.*y;
A(:,4)=1;
A(:,5)=-2*pi.*Hy;
A(:,6)=-2*pi.*Hy.*(y.^2);
A(:,7)=4*pi.*Hy.*y;

Cv(:,1)=2*pi.*Hy.*(y.^4);

for i=1:1:nb_of_eq
    for j=1:1:nb_of_eq
        B(i,j)=sum(A(:,i).*A(:,j));
    end
end

for i=1:1:nb_of_eq
    C(i,1)=sum(Cv(:,1).*A(:,i));
end

Xr=B\C;

eqd = @(d) (8*Xr(6,1)*Xr(2,1)^2*d^2-
Xr(6,1)^2*Xr(2,1)*d+Xr(6,1)*Xr(2,1)*Xr(7,1)-
16*d^3*Xr(6,1)*Xr(2,1)+4*d^2*Xr(2,1)*Xr(7,1)-Xr(7,1)^2-
16*Xr(2,1)^3*d^3+8*d^4*Xr(6,1)+d^2*Xr(6,1)^2-
48*d^5*Xr(2,1)+48*d^4*Xr(2,1)^2+16*d^6-4*d*Xr(2,1)^2*Xr(7,1))/(2*d-Xr(2,1))^2 -
Xr(5,1);
resd = fsolve(eqd , 0); % , options)

d=resd;

b=Xr(2,1)-2*d;

z1=sqrt(b*(Xr(7,1)+3*d^2*b+4*d^3-d*Xr(6,1)))/b;

z2=sqrt(Xr(6,1)-z1^2-b^2-6*d*b-6*d^2);

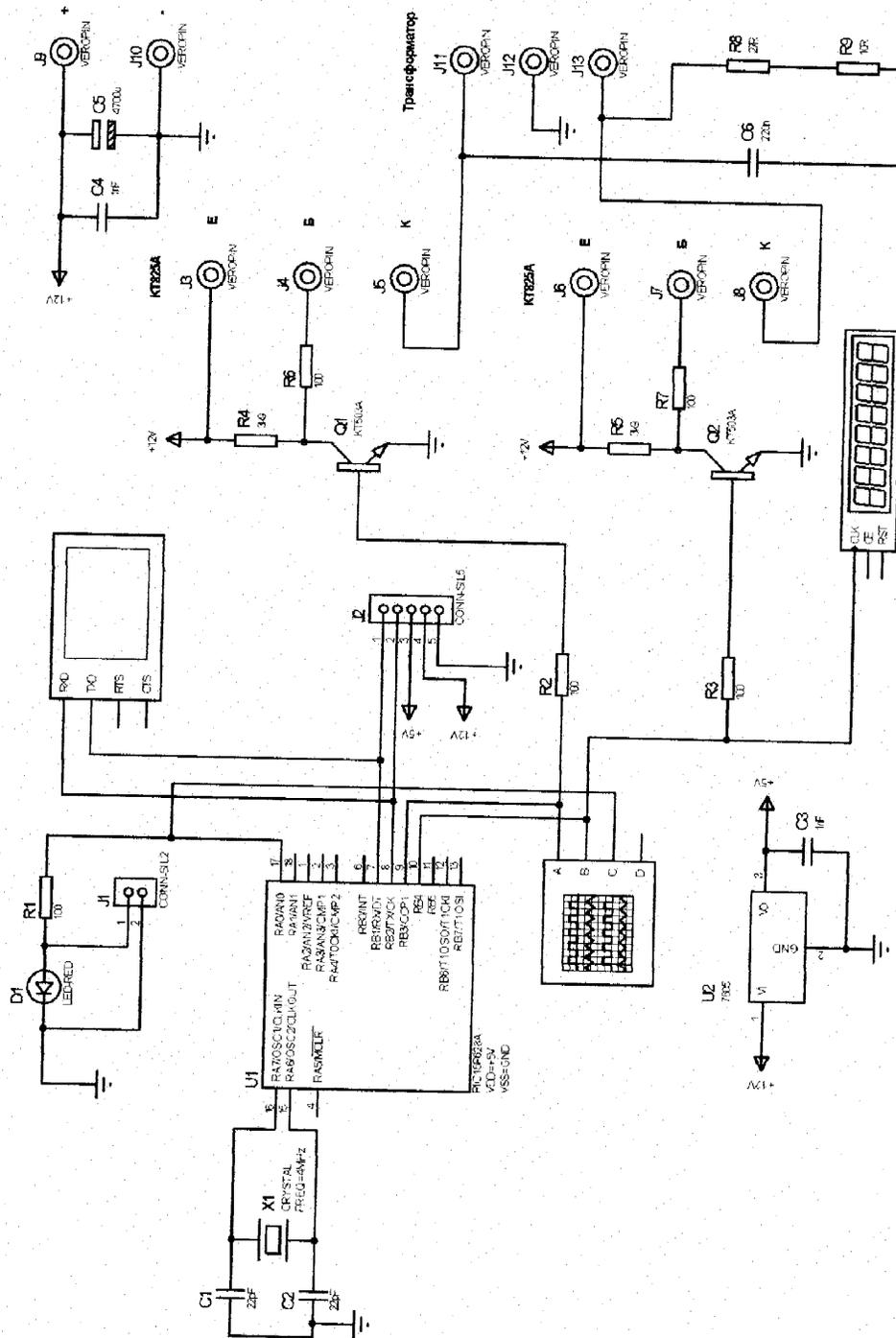
I1= -(-Xr(3,1)+d*Xr(1,1))/(z1*b);

I2= -(-Xr(1,1)+I1*z1)/z2;

```

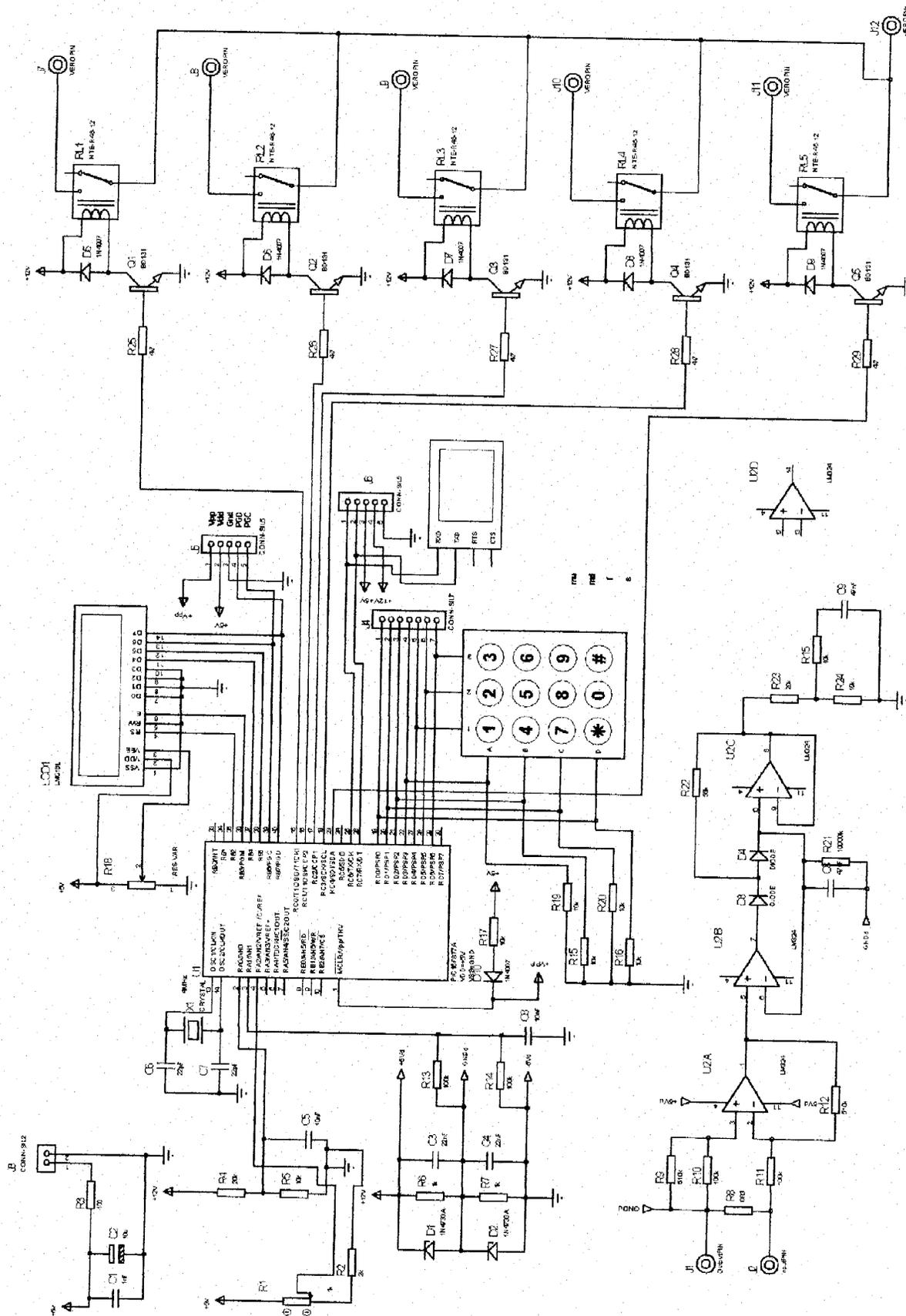
Додаток 3

Принципова електрична схема силового блоку генератора КІ-1-Г



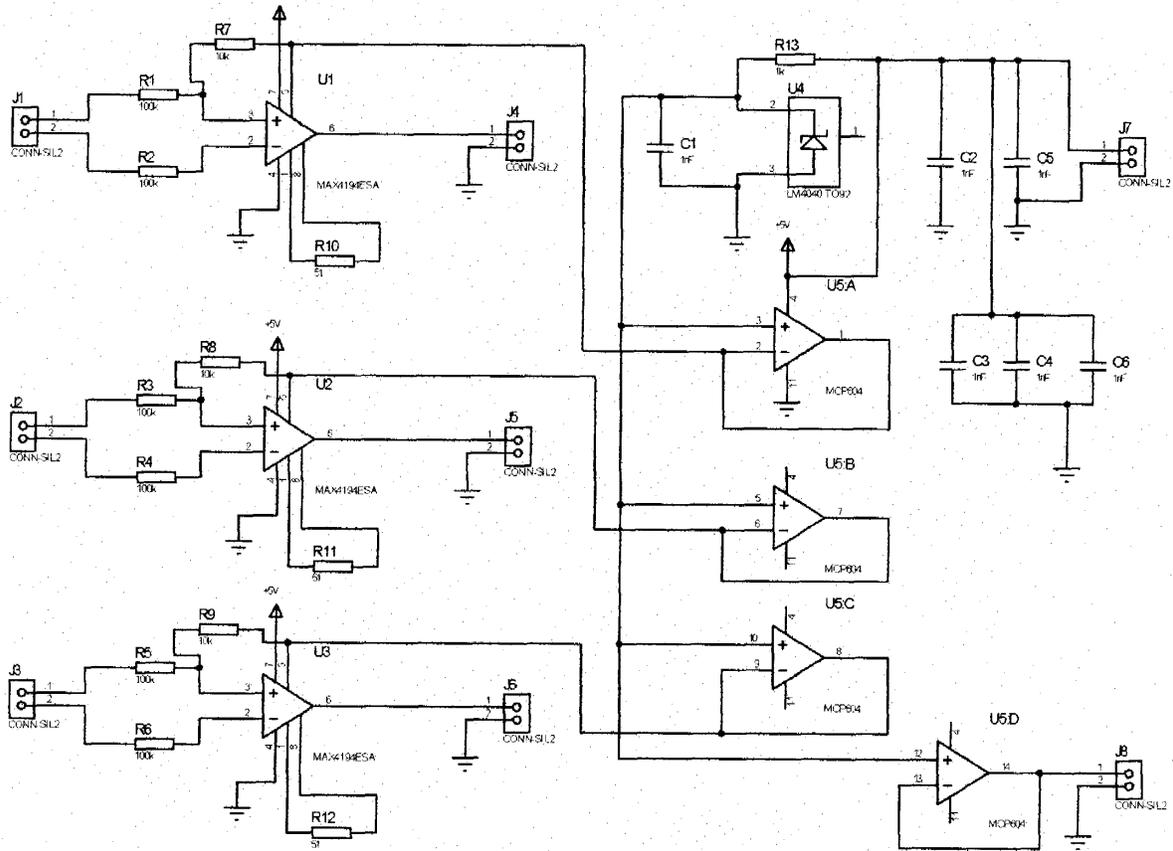
Додаток И

Принципова електрична схема блоку управління генератора КІ-1-Г



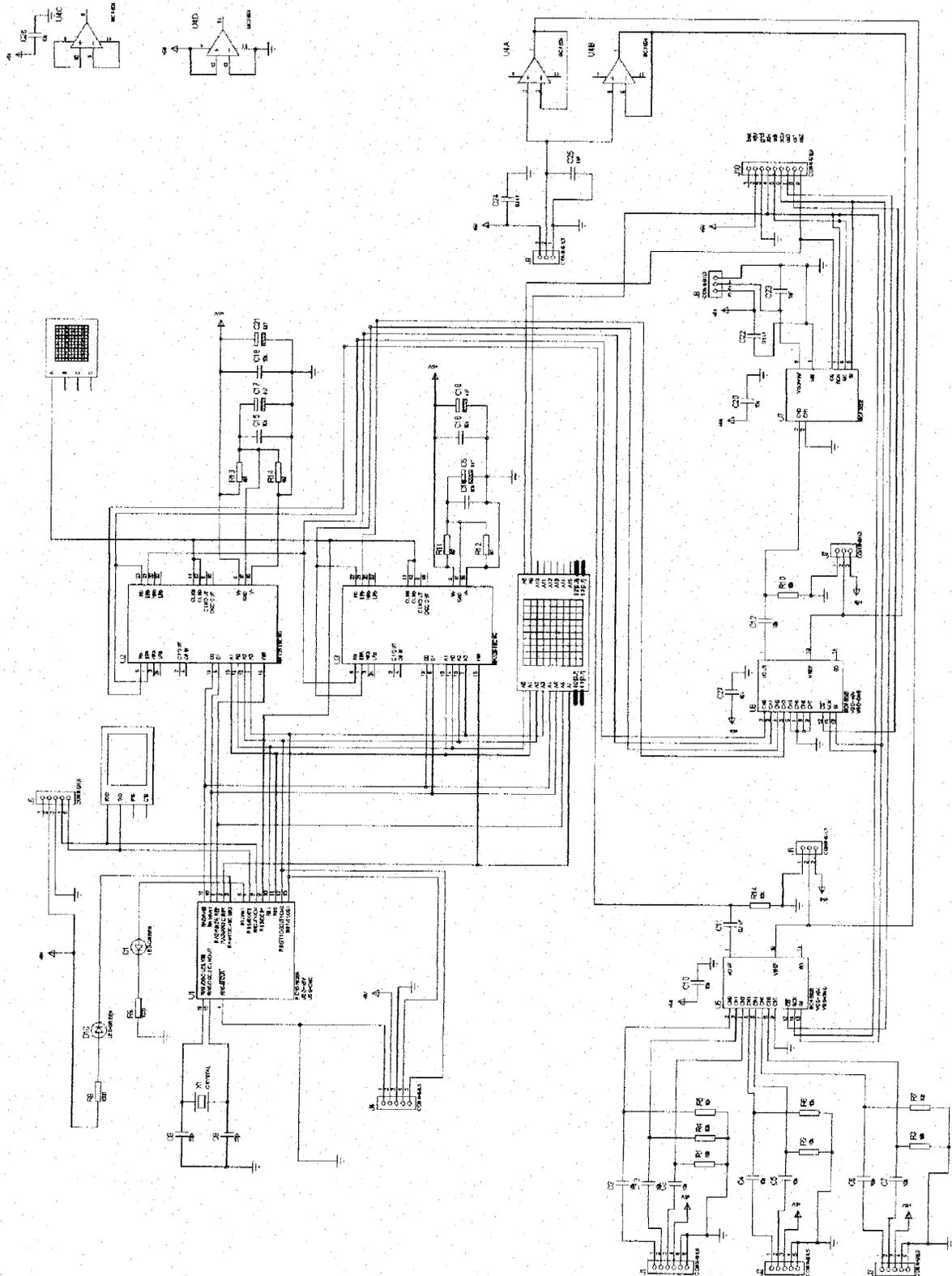
Додаток К

Принципова електрична попередніх підсилювачів приймача КІ-1-П



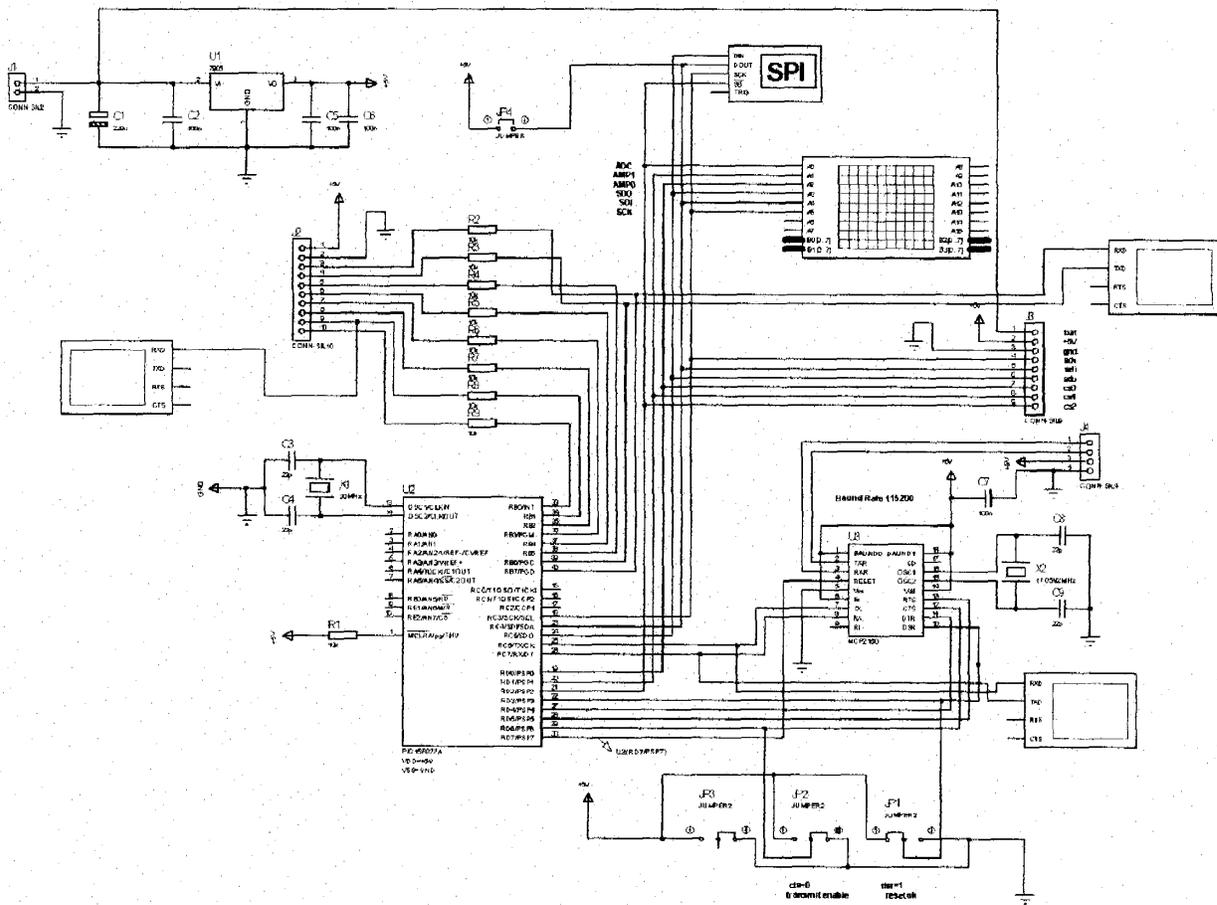
Додаток Л

Принципова електрична схема блоку комутації та фільтрування приймача КІ-1-П



Додаток М

Принципова електрична схема мікроконтролерного блоку приймача КІ-1-П



Додаток Н

Лістинг програм для контролерів генератора КІ-1-Г

Програма PowerCNT.c:

```

//=====
//   PowerCNT v1.0
//   by Bogdan Kostiv
//   usart commands:
//   "S" - start generation
//   "F" - stop generation
//   "Affffddd" - set new freq,
//             ffff-frequency ddd-duration
//             ffff=0100-1000Hz
//             ddd=20-95,100%
//=====

// EEPROM struct
// 0x00,0x01 - Freq1; 0x02 - Dur1; 0x03 - ch1
// 0x04,0x05 - Freq2; 0x06 - Dur2; 0x07 - ch2
// 0x08,0x09 - Freq3; 0x0A - Dur3; 0x0B - ch3
// 0x0C,0x0D - Freq4; 0x0E - Dur4; 0x0F - ch4

#define usart_delay 100

//----- variables -----
unsigned short kp;
char LCD_char[2];
unsigned short LCD_Chng;

unsigned short GenState;
unsigned short OutState;           //0-5
unsigned      Freq;
unsigned      Dur;
unsigned short Usart_byte;
unsigned short Error_var;
unsigned      Upow;
unsigned int   Iout;

unsigned short Function;
unsigned char  EEPROM_H;
unsigned char  EEPROM_L;

unsigned char ch1000;
unsigned char ch100;
unsigned char ch10;
unsigned char ch1;

unsigned      Ucoef;
unsigned      Icoef0;
unsigned      IcoefU;
//-----proc-----

//-----SerupPIC-----
void SetupPic() {
INTCON=0x00;

TRISB=0;

Lcd_Init(&PORTB);

```

Додаток Н

(продовж. 1)

```

Lcd_Cmd(Lcd_CLEAR);
Lcd_Cmd(Lcd_CURSOR_OFF);

ADCON1      = 0x82;           // configure VDD as Vref, and analog
channels
TRISA       = 0xFF;         // designate PORTA as input

TRISC=0xE0; // 0-4 біти на вихід
PORTC=0;

Usart_Init(9600);

Lcd_Out(1, 3, " == KI-1 ==");
Lcd_Out(2, 1, "Generator v1.0=");
Delay_ms(1000);
Lcd_Cmd(Lcd_CLEAR);

TRISE=7;
//TRISD=0;
Keypad_Init(&PORTD);

GenState=0;
Error_var=0;
LCD_Chng=1;

    EEPROM_H=Eeprom_Read(0x10);
    Delay_ms(30);
    EEPROM_L=Eeprom_Read(0x11);
    Delay_ms(30);
    Ucoef=(unsigned) EEPROM_L + (EEPROM_H << 8);

    EEPROM_H=Eeprom_Read(0x14);
    Delay_ms(30);
    EEPROM_L=Eeprom_Read(0x15);
    Delay_ms(30);
    IcoefU=EEPROM_L + (EEPROM_H << 8);
}

//-----Conv3Ch-----
unsigned Val_tmp;
void Conv3Ch(unsigned Val) {
    ch100 =48 + Val / 100;
    Val_tmp=Val-(Val / 100)*100;
    ch10   = 48 + Val_tmp/10;
    ch1=48 + Val_tmp-(Val_tmp / 10)*10;
}

//-----Conv4Ch-----
void Conv4Ch(unsigned Val) {
    ch1000 =48 + Val / 1000;
    Val_tmp=Val-(Val / 1000)*1000;
    ch100   = 48 + Val_tmp/100;
    Val_tmp=Val_tmp-(Val_tmp / 100)*100;
    ch10    = 48 + Val_tmp/10;
}

```

Додаток Н (продовж. 2)

```

    chl=48 + Val_tmp-(Val_tmp / 10)*10;
}

//-----StartGen-----
unsigned short tttt;

void StartGen() {
    LCD_Chng=1;
    Lcd_Cmd(Lcd_CLEAR);
    Lcd_Out(1, 1, "Data Transmit");
    Delay_ms(usart_delay);
    GenState=1;

    while (Usart_Data_Ready()) {
        tttt=Usart_Read();
    }

    Usart_Write('A');
    do { } while (Usart_Data_Ready()==0);
    Usart_byte = Usart_Read();
    if (Usart_byte!='A') { Error_var=1;}

    Conv4Ch(Freq);

    Usart_Write(ch1000);
    do { } while (Usart_Data_Ready()==0);
    Usart_byte = Usart_Read();
    if (Usart_byte!=ch1000) { Error_var=1;}

    Usart_Write(ch100);
    do { } while (Usart_Data_Ready()==0);
    Usart_byte = Usart_Read();
    if (Usart_byte!=ch100) { Error_var=1;}

    Usart_Write(ch10);
    do { } while (Usart_Data_Ready()==0);
    Usart_byte = Usart_Read();
    if (Usart_byte!=ch10) { Error_var=1;}

    Usart_Write(ch1);
    do { } while (Usart_Data_Ready()==0);
    Usart_byte = Usart_Read();
    if (Usart_byte!=ch1) { Error_var=1;}

    Conv3Ch(Dur);

    Usart_Write(ch100);
    do { } while (Usart_Data_Ready()==0);
    Usart_byte = Usart_Read();
    if (Usart_byte!=ch100) { Error_var=1;}

    Usart_Write(ch10);
    do { } while (Usart_Data_Ready()==0);
    Usart_byte = Usart_Read();
    if (Usart_byte!=ch10) { Error_var=1;}

    Usart_Write(ch1);

```

Додаток Н

(продовж. 3)

```

do { } while (Usart_Data_Ready()==0);
Usart_byte = Usart_Read();
if (Usart_byte!=ch1) { Error_var=1;}

Usart_Write('S');
do { } while (Usart_Data_Ready()==0);
Usart_byte = Usart_Read();
if (Usart_byte!='S') { Error_var=1;}
}

//-----StopGen-----
void StopGen() {
    LCD_Chng=1;
    Lcd_Cmd(Lcd_CLEAR);
    Lcd_Out(1, 1, "Data Transmit");
    Delay_ms(usart_delay);
    GenState=0;

    if (Usart_Data_Ready()) {tttt=Usart_Read(); }

    Usart_Write('F');
    do { } while (Usart_Data_Ready()==0);
    Usart_byte = Usart_Read();
    if (Usart_byte!='F') { Error_var=2;}
}

//-----GetGenVal-----
unsigned    adc_rd;
unsigned    Is;
unsigned long tempADC;
unsigned long ADCSum;
unsigned    ic,jc;
void GetGenVal() {

    adc_rd = ADC_read(0);                // get ADC value from 2nd channel

    tempADC = (unsigned long) adc_rd * Ucoef;
    tempADC = (unsigned long) tempADC / 1023;
    Upow = (unsigned int) tempADC;

    Conv3Ch(Upow);
    LCD_Chr(2,4,'U');
    LCD_Chr_CP('=');
    LCD_Chr_CP(ch100);
    LCD_Chr_CP(ch10);
    LCD_Chr_CP('.');
    LCD_Chr_CP(ch1);

    ADCSum=0;
    for ( ic = 1; ic <= 7; ic++ ) {
        ADCSum = ADCSum + ADC_read(2);
    }
}

```

Додаток Н (продовж. 4)

```

    for ( jc = 1; jc <= (unsigned) 10000/(Freq * 7); jc++ ) {
Delay_us(100); }
}

adc_rd = (unsigned) ADCSum/7;
adc_rd = adc_rd-ADC_read(1);

tempADC = (unsigned long) (adc_rd) * IcoefU;
tempADC = (unsigned long) tempADC / 1023;
Is=(unsigned int) tempADC;

if (Is>900) { Is=0; }

if (Is>300) { StopGen(); }

Conv3Ch(Is);

LCD_Chr(2,11,'I');
LCD_Chr_CP('=');
LCD_Chr_CP(ch100);
LCD_Chr_CP('.');
LCD_Chr_CP(ch10);
LCD_Chr_CP(ch1);
}

//-----ShowLCD-----
unsigned char ch;

void ShowLCD() {
Lcd_Cmd(Lcd_CLEAR);
if (Error_var != 0) {
    Lcd_Cmd(Lcd_CLEAR);
    Lcd_Out(1, 1, "Error");
    if (Error_var == 1) {Lcd_Out(2, 1, "Start");}
    if (Error_var == 2) {Lcd_Out(2, 1, "Finish");}
    Delay_ms(3000);
    Lcd_Cmd(Lcd_CLEAR);
    Lcd_Out(1, 1, "Restart Please");
    do {} while(1);
}
if (GenState==0) {
    Lcd_Out(1, 1, "S");}
else {
    Lcd_Out(1, 1, "G");}

Conv4Ch(Freq);
LCD_Chr(1,3,ch1000);
LCD_Chr_CP(ch100);
LCD_Chr_CP(ch10);
LCD_Chr_CP(ch1);
LCD_Chr_CP('H');
LCD_Chr_CP('z');
LCD_Chr_CP(' ');
Conv3Ch(Dur);

```

Додаток Н

(продовж. 5)

```

LCD_Chr_CP(ch100);
LCD_Chr_CP(ch10);
LCD_Chr_CP(ch1);
LCD_Chr_CP('%');

LCD_Chr(1, 15, 'L');
switch (OutState) {
case 0: LCD_Chr(1,16, '0'); break;
case 1: LCD_Chr(1,16, '1'); break;
case 2: LCD_Chr(1,16, '2'); break;
case 4: LCD_Chr(1,16, '3'); break;
case 8: LCD_Chr(1,16, '4'); break;
case 16: LCD_Chr(1,16, '5'); break;
}

if (Function!=0) {
    LCD_Chr(2,1,'F');
    LCD_Chr_CP(Function+48);
}
else {
    LCD_Chr(2,1,'*');
    LCD_Chr_CP('*');
}

LCD_Chng=0;
}

//-----LoadDn-----
void LoadDn() {
    LCD_Chng=1;
    PORTC=0;
    OutState = OutState >> 1;
    PORTC=OutState;
    do {} while (Keypad_Read()!=0);
}

//-----LoadUp-----
void LoadUp() {
    LCD_Chng=1;
    PORTC=0;
    OutState = OutState << 1;
    if (OutState==0) {OutState=1;};
    if (OutState>16) {OutState=16;};
    PORTC=OutState;
    do {} while (Keypad_Read()!=0);
}

//-----Mode-----
unsigned short i;
void Mode() {
if (GenState) {StopGen(); }
Function=0;
Lcd_Cmd(Lcd_CLEAR);
Lcd_Out(1, 1, "Frequency");
Conv4Ch(Freq);

```

Додаток Н

(продовж. б)

```

LCD_Chr(2,7,ch1000);
LCD_Chr_CP(ch100);
LCD_Chr_CP(ch10);
LCD_Chr_CP(ch1);
do {
    kp = 0;
    kp = Keypad_Read();

    if (kp==2) {
        Freq=Freq+1;
        if (Freq>1500) {Freq=1500;}
        if (Freq<20) {Freq=20;}
        Conv4Ch(Freq);
        LCD_Chr(2,7,ch1000);
        LCD_Chr_CP(ch100);
        LCD_Chr_CP(ch10);
        LCD_Chr_CP(ch1);

        for (i=0; i<20; i++ ) {Delay_ms(50);
        if (Keypad_Read()==0) {goto Freq_up_cycle;}
        }
Freq_up_cycle:
        do {
            kp = 0;
            kp = Keypad_Read();
            if (kp==2) {Freq=Freq+10;}
            if (Freq>1500) {Freq=1500;}
            if (Freq<20) {Freq=20;}
            Conv4Ch(Freq);
            LCD_Chr(2,7,ch1000);
            LCD_Chr_CP(ch100);
            LCD_Chr_CP(ch10);
            LCD_Chr_CP(ch1);
            Delay_ms(100);
        } while (kp==2);

    }

    if (kp==6) {
        Freq=Freq-1;
        if (Freq>1500) {Freq=1500;}
        if (Freq<20) {Freq=20;}
        Conv4Ch(Freq);
        LCD_Chr(2,7,ch1000);
        LCD_Chr_CP(ch100);
        LCD_Chr_CP(ch10);
        LCD_Chr_CP(ch1);

        for (i=0; i<20; i++ ) {Delay_ms(50);
        if (Keypad_Read()==0) {goto Freq_dn_cycle;}
        }
Freq_dn_cycle:
        do {
            kp = 0;
            kp = Keypad_Read();
            if (kp==6) {Freq=Freq-10;}
            if (Freq>1500) {Freq=1500;}

```

Додаток Н

(продовж. 7)

```

        if (Freq<20) {Freq=20;}
        Conv4Ch(Freq);
        LCD_Chr(2,7,ch1000);
        LCD_Chr_CP(ch100);
        LCD_Chr_CP(ch10);
        LCD_Chr_CP(ch1);
        Delay_ms(100);
    } while (kp==6);

}

} while (kp!=3);

Delay_ms(500);
Lcd_Cmd(Lcd_CLEAR);
Lcd_Out(1, 1, "Filling factor");
Conv3Ch(Dur);
LCD_Chr(2,7,ch100);
LCD_Chr_CP(ch10);
LCD_Chr_CP(ch1);

do {
    kp = 0;
    kp = Keypad_Read();

    if (kp==2) {
        Dur=Dur+1;
        if (Dur>90) {Dur=100;}
        if (Dur<20) {Dur=20;}
        Conv3Ch(Dur);
        LCD_Chr(2,7,ch100);
        LCD_Chr_CP(ch10);
        LCD_Chr_CP(ch1);

        for (i=0; i<20; i++ ) {Delay_ms(50);
            if (Keypad_Read()==0) {goto Dur_up_cycle;}
        }
Dur_up_cycle:
        do {
            kp = 0;
            kp = Keypad_Read();
            if (kp==2) {Dur=Dur+10;}
            if (Dur>90) {Dur=100;}
            if (Dur<20) {Dur=20;}
            Conv3Ch(Dur);
            LCD_Chr(2,7,ch100);
            LCD_Chr_CP(ch10);
            LCD_Chr_CP(ch1);
            Delay_ms(100);
        } while (kp==2);

    }

    if (kp==6) {
        Dur=Dur-1;
        if (Dur>90) {Dur=100;}
        if (Dur>=98) {Dur=90;}
        if (Dur<20) {Dur=20;}
    }
}

```

Додаток Н

(продовж. 8)

```

Conv3Ch(Dur);
LCD_Chr(2,7,ch100);
LCD_Chr_CP(ch10);
LCD_Chr_CP(ch1);

for (i=0; i<20; i++ ) {Delay_ms(50);
if (Keypad_Read()==0) {goto Dur_dn_cycle;}
}
Dur_dn_cycle:
do {
kp = 0;
kp = Keypad_Read();
if (kp==6) {Dur=Dur-10;}
if (Dur>90) {Dur=100;}
if (Dur<20) {Dur=20;}
Conv3Ch(Dur);
LCD_Chr(2,7,ch100);
LCD_Chr_CP(ch10);
LCD_Chr_CP(ch1);
Delay_ms(100);
} while (kp==6);

}

} while (kp!=3);
Delay_ms(800);
do {} while (Keypad_Read()!=0);
LCD_Chng=1;
}

//-----Save-----
void Save() {
Lcd_Cmd(Lcd_CLEAR);
Lcd_Out(1, 1, "Sel. F1-F4 butt.");
Delay_ms(600);
do {
kp = 0;
kp = Keypad_Released();
} while ( !((kp==9) || (kp==10) || (kp==11) || (kp==12) || (kp==4)) );
if (kp==9) {
Function=1;
Lcd_Out(2, 8, "F1");

Delay_ms(100);
EEPROM_L=Freq;
EEPROM_H=Freq >> 8;

Eeprom_Write(0, EEPROM_H);
Delay_ms(100);
Eeprom_Write(1, EEPROM_L);
Delay_ms(100);
Eeprom_Write(2, Dur);
Delay_ms(100);
Eeprom_Write(3, OutState);
Delay_ms(100);
}
if (kp==10) {
Function=2;

```

Додаток Н

(продовж. 9)

```

    Lcd_Out(2, 8, "F2");

    Delay_ms(100);
    EEPROM_L=Freq;
    EEPROM_H=Freq >> 8;

    Eeprom_Write(4, EEPROM_H);
    Delay_ms(100);
    Eeprom_Write(5, EEPROM_L);
    Delay_ms(100);
    Eeprom_Write(6, Dur);
    Delay_ms(100);
    Eeprom_Write(7, OutState);
    Delay_ms(100);
}
if (kp==11) {
    Function=3;
    Lcd_Out(2, 8, "F3");

    Delay_ms(100);
    EEPROM_L=Freq;
    EEPROM_H=Freq >> 8;

    Eeprom_Write(8, EEPROM_H);
    Delay_ms(100);
    Eeprom_Write(9, EEPROM_L);
    Delay_ms(100);
    Eeprom_Write(10, Dur);
    Delay_ms(100);
    Eeprom_Write(11, OutState);
    Delay_ms(100);
}

if (kp==12) {
    Function=4;
    Lcd_Out(2, 8, "F4");

    Delay_ms(100);
    EEPROM_L=Freq;
    EEPROM_H=Freq >> 8;

    Eeprom_Write(12, EEPROM_H);
    Delay_ms(100);
    Eeprom_Write(13, EEPROM_L);
    Delay_ms(100);
    Eeprom_Write(14, Dur);
    Delay_ms(100);
    Eeprom_Write(15, OutState);
    Delay_ms(100);
}

if (kp==4) {
    Lcd_Out(2, 7, "----");
}

LCD_Chng=1;
Delay_ms(1000);
do {} while (Keypad_Read()!=0);

```

Додаток Н

(продовж. 10)

```

}

//-----F1-F4-----
void F1() {
    if (GenState) {StopGen(); }
    Lcd_Cmd(Lcd_CLEAR);
    Lcd_Out(1, 1, " Function F1");
    Delay_ms(600);
    Function=1;

    EEPROM_H=Eeprom_Read(0);
    Delay_ms(100);
    EEPROM_L=Eeprom_Read(1);
    Delay_ms(100);

    Freq=EEPROM_L + (EEPROM_H << 8);
    Delay_ms(100);
    Dur=Eeprom_Read(2);
    Delay_ms(100);
    OutState=Eeprom_Read(3);
    Delay_ms(100);

    LCD_Chng=1;
    kp = 0;
    kp = Keypad_Released();
    Delay_ms(700);
    do {} while (Keypad_Read()!=0);
}

void F2() {
    if (GenState) {StopGen(); }
    Lcd_Cmd(Lcd_CLEAR);
    Lcd_Out(1, 1, " Function F2");
    Delay_ms(600);
    Function=2;

    EEPROM_H=Eeprom_Read(4);
    Delay_ms(100);
    EEPROM_L=Eeprom_Read(5);
    Delay_ms(100);

    Freq=EEPROM_L + (EEPROM_H << 8);
    Delay_ms(100);
    Dur=Eeprom_Read(6);
    Delay_ms(100);
    OutState=Eeprom_Read(7);
    Delay_ms(100);

    LCD_Chng=1;
    kp = 0;
    kp = Keypad_Released();
    Delay_ms(700);
    do {} while (Keypad_Read()!=0);
}

void F3() {
    if (GenState) {StopGen(); }
    Lcd_Cmd(Lcd_CLEAR);

```

Додаток Н

(продовж. 11)

```

Lcd_Out(1, 1, " Function F3");
Delay_ms(600);
Function=3;

EEPROM_H=Eeprom_Read(8);
Delay_ms(100);
EEPROM_L=Eeprom_Read(9);
Delay_ms(100);

Freq=EEPROM_L + (EEPROM_H << 8);
Delay_ms(100);
Dur=Eeprom_Read(10);
Delay_ms(100);
OutState=Eeprom_Read(11);
Delay_ms(100);

LCD_Chng=1;
kp = 0;
kp = Keypad_Released();
Delay_ms(700);
do {} while (Keypad_Read()!=0);
}

void F4() {
  if (GenState) {StopGen(); }
  Lcd_Cmd(Lcd_CLEAR);
  Lcd_Out(1, 1, " Function F4");
  Delay_ms(600);
  Function=4;

  EEPROM_H=Eeprom_Read(12);
  Delay_ms(100);
  EEPROM_L=Eeprom_Read(13);
  Delay_ms(100);

  Freq=EEPROM_L + (EEPROM_H << 8);
  Delay_ms(100);
  Dur=Eeprom_Read(14);
  Delay_ms(100);
  OutState=Eeprom_Read(15);
  Delay_ms(100);

  LCD_Chng=1;
  kp = 0;
  kp = Keypad_Released();
  Delay_ms(700);
  do {} while (Keypad_Read()!=0);
}

//-----Calibr-----
unsigned      Ucoef_t;
unsigned      IcoefU_t;
void Calibr() {
  Ucoef_t=Ucoef;
  IcoefU_t=IcoefU;

Calibr_Start:
  Lcd_Cmd(Lcd_CLEAR);

```

Додаток Н

(продовж. 12)

```

Lcd_Out(1, 1, "Calibr F1-U F2-I");
Lcd_Out(2, 1, "Select F1 - F3");
do {
    kp = 0;
    kp = Keypad_Read();

    GetGenVal();

    if (kp==8) {goto Calibr_Start}
    if (kp==7) {goto Calibr_Save}
    if (kp==4) {goto Calibr_End}

    //Ucoef
    if (kp==9) {
        Delay_ms(1000);
        Lcd_Cmd(Lcd_CLEAR);
        Lcd_Out(1, 1, "Calibration U");
        do {
            kp = 0;
            kp = Keypad_Read();
            if (kp==2) {Ucoef=Ucoef+1;}
            if (kp==6) {Ucoef=Ucoef-1;}
            if (kp==8) {goto Calibr_Start}
            if (kp==7) {goto Calibr_Save}
            if (kp==4) {goto Calibr_End}
            GetGenVal();
            Delay_ms(300);
        } while (1);
    }
    //IcoefU
    if (kp==10) {
        Delay_ms(1000);
        Lcd_Cmd(Lcd_CLEAR);
        Lcd_Out(1, 1, "Calibration I");
        do {
            kp = 0;
            kp = Keypad_Read();
            if (kp==2) {IcoefU=IcoefU+20;}
            if (kp==6) {IcoefU=IcoefU-20;}
            if (kp==8) {goto Calibr_Start}
            if (kp==7) {goto Calibr_Save}
            if (kp==4) {goto Calibr_End}
            GetGenVal();
            Delay_ms(300);
        } while (1);
    }

    Delay_ms(100);

} while ( 1 );
Calibr_Save:
Ucoef_t=Ucoef;
IcoefU_t=IcoefU;

Eeprom_Write(0x10, Ucoef >> 8 );
Delay_ms(30);
Eeprom_Write(0x11, Ucoef);
Delay_ms(30);

```

Додаток Н (продовж. 13)

```

Eeprom_Write(0x14, IcoefU >> 8 );
Delay_ms(30);
Eeprom_Write(0x15, IcoefU );
Delay_ms(30);

Calibr_End:
    Ucoef=Ucoef_t;
    IcoefU=IcoefU_t;
    LCD_Chng=1;
    do {} while (Keypad_Read()!=0);
}

//-----main-----
void Main() {
    SetupPic();
    F1();
    do {
        kp = 0;
        kp = Keypad_Read();
        Delay_ms(100);
        if (LCD_Chng==1) {ShowLCD();}
        if (kp!=0) {
            if (kp==1) { StartGen(); }
            if (kp==5) { StopGen(); }
            if (kp==6) { LoadDn(); }
            if (kp==2) { LoadUp(); }
            if (kp==3) { Mode(); }
            if (kp==7) { Save(); }
            if (kp==9) { F1(); }
            if (kp==10) { F2(); }
            if (kp==11) { F3(); }
            if (kp==12) { F4(); }
            if (kp==8) { Calibr(); }
        }
        GetGenVal();
    } while (1);
}

```

Програма PowerGen.c:

```

//=====
//      PowerGen v1.0
//      by Bogdan Kostiv
//      usart commands:
//      "S" - start generation
//      "F" - stop generation
//      "Affffddd" - set new freq,
//                  ffff-frequsency ddd-duration
//                  ffff=0100-1000Hz
//                  ddd=20-95,100%
//=====

//----- variables -----
#define LED PORTA.F0

```

Додаток Н

(продовж. 14)

```

#define Drive1 PORTB.F3
#define Drive2 PORTB.F4

int  Cykle_gen;
int  Gen;
int  Data_usart;
int  Freq;
int  Skv;
long Cilc;
long Cilc_H_temp;
long Cilc_L_temp;
unsigned Cilc_H;
unsigned Cilc_L;
unsigned Timer_err;

char TMR1H_val;
char TMR1L_val;
char Drive1_val;
char Drive2_val;

char F1000;
char F100;
char F10;
char F1;
char S100;
char S10;
char S1;

typedef struct Ldiv_r {long quot, rem;} Ldiv_r;
Ldiv_r Ldiv_rez;

unsigned short Cilc_H_tmr_h;
unsigned short Cilc_H_tmr_l;
unsigned short Cilc_L_tmr_h;
unsigned short Cilc_L_tmr_l;

//-----proc-----
void SetupPic() {
INTCON=0x40;
PIR1=0;
PIE1=1;
T1CON=8;
CMCON=7;
TRISA=254;
TRISB=231;
PORTB=0;
Gen=0;
Usart_Init(9600);
LED=1;
Delay_ms(200);
LED=0;
Delay_ms(200);
LED=1;
Delay_ms(200);
LED=0;
Delay_ms(200);
}

```

Додаток Н

(продовж. 15)

```

LED=1;
Delay_ms(200);
LED=0;
Delay_ms(200);
}

void GenOn(){
Cykle_gen=1;
if ((Cilc_H_tmr_h==0) & (Cilc_H_tmr_l==0)) {
    Cilc_H_tmr_h=0xFC;           // 500 Hz 80%
    Cilc_H_tmr_l=0xE0;
    Cilc_L_tmr_h=0xFF;
    Cilc_L_tmr_l=0x38;
}

TMR1H=Cilc_H_tmr_h;
TMR1L=Cilc_H_tmr_l;

INTCON.GIE = 1;
T1CON.TMR1ON=1;

Drive1=1;
Drive2=0;

Gen=1;
LED=1;
}

void GenOff(){
INTCON.GIE = 0;
T1CON.TMR1ON=0;
Drive1=0;
Drive2=0;
Gen=0;
LED=0 ;
}

int fjfj;

char txt[7];
void SetGen(){
Drive1=0;
Drive2=0;
Freq=0;
Skv=0;
if (Gen==1) GenOff();
do {} while (Usart_Data_Ready()==0);
    F1000 = Usart_Read();
    Usart_Write(F1000);
do {} while (Usart_Data_Ready()==0);
    F100 = Usart_Read();
    Usart_Write(F100);
do {} while (Usart_Data_Ready()==0);
    F10 = Usart_Read();
    Usart_Write(F10);
do {} while (Usart_Data_Ready()==0);
    F1 = Usart_Read();

```

Додаток Н

(продовж. 16)

```

    Usart_Write(F1);
do {} while (Usart_Data_Ready()==0);
    S100 = Usart_Read();
    Usart_Write(S100);
do {} while (Usart_Data_Ready()==0);
    S10 = Usart_Read();
    Usart_Write(S10);
do {} while (Usart_Data_Ready()==0);
    S1 = Usart_Read();
    Usart_Write(S1);

Freq=1000*(F1000-48)+100*(F100-48)+10*(F10-48)+(F1-48);
Skv=100*(S100-48)+10*(S10-48)+(S1-48);

Freq = Freq;

Ldiv_rez=ldiv(2500000,Freq);
Cilc=Ldiv_rez.quot;

Ldiv_rez=ldiv(Cilc*Skv,100);

Timer_err = 0;
Cilc_H_temp=Ldiv_rez.quot-Timer_err;
Cilc_L_temp=Cilc-Cilc_H_temp-Timer_err;

Usart_Write(Cilc_H_temp>>8);
Usart_Write(Cilc_H_temp);
Usart_Write(Cilc_L_temp>>8);
Usart_Write(Cilc_L_temp);

Cilc_H=Cilc_H_temp;
Cilc_L=Cilc_L_temp;
Cilc_H=0-Cilc_H;
Cilc_L=0-Cilc_L;

Cilc_H_tmr_h= (0xFF00 & Cilc_H) >> 8;
Cilc_H_tmr_l= 0xFF & Cilc_H;
Cilc_L_tmr_h= (0xFF00 & Cilc_L) >> 8;
Cilc_L_tmr_l= 0xFF & Cilc_L;

//Usart_Write(Cilc_H_tmr_h);
//Usart_Write(Cilc_H_tmr_l);
//Usart_Write(Cilc_L_tmr_h);
//Usart_Write(Cilc_L_tmr_l);
//Usart_Write(Freq >> 8);
//Usart_Write(Freq);
//Usart_Write(Skv);

}
//-----interrupt-----
void Interrupt() {
    TMR1H=TMR1H_val;
    TMR1L=TMR1L_val;
    Drive1=Drive1_val;
    Drive2=Drive2_val;

```

Додаток Н

(продовж. 17)

```

switch (Cykle_gen) {
  case 1 :
    { TMR1H_val=Cilc_H_tmr_h;
      TMR1L_val=Cilc_H_tmr_l;
      Drive1_val=1;
      Drive2_val=0;
      if ((Cilc_L_tmr_h==0) & (Cilc_L_tmr_l==0)) {Cykle_gen++;}
      break;
    }
  case 2 :
    { TMR1H_val=Cilc_L_tmr_h;
      TMR1L_val=Cilc_L_tmr_l;
      Drive1_val=0;
      Drive2_val=0;
      break;
    }
  case 3 :
    { TMR1H_val=Cilc_H_tmr_h;
      TMR1L_val=Cilc_H_tmr_l;
      Drive1_val=0;
      Drive2_val=1;
      if ((Cilc_L_tmr_h==0) & (Cilc_L_tmr_l==0)) {Cykle_gen++;}
      break;
    }
  case 4 :
    {
      TMR1H_val=Cilc_L_tmr_h;
      TMR1L_val=Cilc_L_tmr_l;
      Drive1_val=0;
      Drive2_val=0;
      break;
    }
}

Cykle_gen++;
if (Cykle_gen==5) Cykle_gen=1;
PIR1=0;
} //~

//-----main-----
void Main() {
  SetupPic();

  do {
    if (Usart_Data_Ready()) {
      Data_usart = Usart_Read();
      Usart_Write(Data_usart);
      if (Data_usart=='S') GenOn();
      if (Data_usart=='F') GenOff();
      if (Data_usart=='A') SetGen();
    }
  } while (1);
}

```

Додаток П

Лістинг програм для контролерів приймача КІ-1-П

Програма КІ1.с:

```

#include "D:\doks\Univer\Aspirant\pribor\pryjmach\KI1\KI1.h"

//IRDA define
#define IRDA_BAUD0 PIN_B4
#define IRDA_BAUD1 PIN_B5
#define RESET_IrDA PIN_D7
#define RTS_IrDA PIN_D5
#define CTS_IrDA PIN_D6
#define DTR_IrDA PIN_D4
#define DSR_IrDA PIN_D3

#define led PIN_B0

#define CS_ADC PIN_D2
#define CS_AMP0 PIN_D0
#define CS_AMP1 PIN_D1

#define SPI_CLK PIN_C3
#define SPI_DO PIN_C5
#define SPI_DI PIN_C4

#define DEBUG_EN 1 // 1-дозвіл дебагу 0-заборона дебагу

char output_flag, output_flag_o;
char Filter_conf_addr, Filter_chn, Amp0, Amp1;
int Delay, Nmb_meas;
char Channel0;

char check_ppc_receive();
void ppc_con_receive();
void ppc_con_transmit(char Data_send);
char get_receive_data();
void send_data();
void process_receive(char rec_data);
void amp1_set (int1 mode_0gain_1ch, char data);
void amp0_set (int1 mode_0gain_1ch, char data);
int16 Get_ADC();
void reset_IrDA_dev();
void WriteDeviceID();
void ppc_con_transmit_series(int16 ADC1, int16 ADC2, int16 ADC3, int16 ADC4,
int16 ADC5, int16 ADC6, int16 ADC7);
void ppc_con_transmit_byte(char Data);
void BlinkLed();

void BlinkLed()
{
    int i;
    for (i=1;i<=5;++i) {
        output_high(LED);
        delay_ms(200);
        output_low(LED);
        delay_ms(200);
    }
}

void reset_IrDA_dev() {

```


Додаток II

(продовж. 2)

```

Delay_us(1000);
ppc_con_transmit ( ' ' );
Delay_us(1000);
output_low(DTR_IrDA);
//output_high(RTS_IrDA);
output_high(RESET_IrDA);
Delay_us(1000);
reset_IrDA_dev();
}

int16 Get_ADC() {
int16 command;
int16 result;
char i;
    result = 0;
    command = 0b00000000000001011;
//    output_high(SPI_CLK);
//    output_low(SPI_DO);
//    delay_us(1);
    output_low(CS_ADC);
//delay_us(1);
    output_low(SPI_CLK);
//delay_us(1);
    output_high(SPI_CLK);

    for (i=1;i<=17;++i) {
        result = result <<1;

        output_low(SPI_CLK);
//output_bit( SPI_DO, (command&1));
        if ((command&1)==1) output_high(SPI_DO);
            else output_low(SPI_DO);
        command = command>>1;
//delay_us(1);
        output_high(SPI_CLK);
//delay_us(1);
        if( input(SPI_DI) ) result = result | 1;
    }
    result = result & 0b0000111111111111;
    output_high(CS_ADC);
    return (result);
}

void ampl_set (int1 mode_0gain_lch, char data)
{
int16 command;
char i;
    command = ( (int16) mode_0gain_lch << 8) + data + 0x4000;

    output_high(SPI_CLK);
    output_low(SPI_DO);
    delay_us(1);
    output_low(CS_AMP1);
    delay_us(1);

    for (i=1;i<=16;++i) {

```

Додаток П

(продовж. 3)

```

        output_low(SPI_CLK);
        if ((command & 0x8000) == 0) output_low (SPI_DO);
            else output_high(SPI_DO);
        command = command<<1;
        output_high(SPI_CLK);
    }
    output_high(CS_AMP1);
}

void amp0_set (int16 mode_0gain_lch, char data)
{
int16 command;
char i;
    command = ( (int16) mode_0gain_lch << 8) + data + 0x4000;

    output_high(SPI_CLK);
    output_low(SPI_DO);
    delay_us(1);
    output_low(CS_AMP0);
    delay_us(1);

    for (i=1;i<=16;++i) {
        output_low(SPI_CLK);
        if ((command & 0x8000) == 0) output_low (SPI_DO);
            else output_high(SPI_DO);
        command = command<<1;
        output_high(SPI_CLK);
    }
    output_high(CS_AMP0);
}

char check_ppc_receive() //0-no data; 1-data
{
    return(kbhit (PPC_CON));
}

char get_receive_data()
{
    return(fgetc(PPC_CON));
}

void ppc_con_transmit_byte(char Data)
{
    output_high(RTS_IrDA);
    ppc_con_transmit(Data);
    output_low(RTS_IrDA);
}

void ppc_con_transmit_series(int16 ADC1_d, int16 ADC2_d, int16 ADC3_d, int16
ADC4_d, int16 ADC5_d, int16 ADC6_d, int16 ADC7_d)
{
int16 temp;
    output_high(RTS_IrDA);
    ppc_con_transmit('D');

    temp = (int16) ADC1_d;

```

Додаток П

(продовж. 4)

```

ppc_con_transmit( (char) ((temp >> 8) & 0xF) );
ppc_con_transmit( (char) ((temp >> 4) & 0xF) );
ppc_con_transmit( (char) (temp & 0xF) );

temp = (int16) ADC2_d;
ppc_con_transmit( (char) ((temp >> 8) & 0xF) );
ppc_con_transmit( (char) ((temp >> 4) & 0xF) );
ppc_con_transmit( (char) (temp & 0xF) );

temp = (int16) ADC3_d;
ppc_con_transmit( ((temp >> 8) & 0xF) );
ppc_con_transmit( ((temp >> 4) & 0xF) );
ppc_con_transmit( (temp & 0xF) );

temp = (int16) ADC4_d;
ppc_con_transmit( (char) ((temp >> 8) & 0xF) );
ppc_con_transmit( (char) ((temp >> 4) & 0xF) );
ppc_con_transmit( (char) (temp & 0xF) );

temp = (int16) ADC5_d;
ppc_con_transmit( (char) ((temp >> 8) & 0xF) );
ppc_con_transmit( (char) ((temp >> 4) & 0xF) );
ppc_con_transmit( (char) (temp & 0xF) );

temp = (int16) ADC6_d;
ppc_con_transmit( (char) ((temp >> 8) & 0xF) );
ppc_con_transmit( (char) ((temp >> 4) & 0xF) );
ppc_con_transmit( (char) (temp & 0xF) );

temp = (int16) ADC7_d;
ppc_con_transmit( (char) ((temp >> 8) & 0xF) );
ppc_con_transmit( (char) ((temp >> 4) & 0xF) );
ppc_con_transmit( (char) (temp & 0xF) );

output_low(RTS_IrDA);

while ( input(CTS_IrDA) == 0) { // чекаємо, поки CTS_IrDA стане 1
}

}

void ppc_con_transmit(char Data_send){
    while ( input(CTS_IrDA) == 1) { // чекаємо, поки CTS_IrDA стане 0
    }
    putc(Data_send, PPC_CON);
}

void ppc_con_receive()
{
//BlinkLed();
    process_receive(fgetc(PPC_CON));
}

void process_receive(char rec_data)
{
    unsigned int i;
//int16 temp;
    if (rec_data == 'R') {

```

Додаток П

(продовж. 5)

```

while (check_ppc_receive()==0) {}
Filter_conf_addr = get_receive_data();
while (check_ppc_receive()==0) {}
Filter_chn = get_receive_data();
    ampl_set (1, Filter_chn);
while (check_ppc_receive()==0) {}
Amp0 = get_receive_data();
    amp0_set (0, Amp0);
while (check_ppc_receive()==0) {}
Amp1 = get_receive_data();
    ampl_set (0, Amp1);
while (check_ppc_receive()==0) {}
delay = get_receive_data();
while (check_ppc_receive()==0) {}
Nmb_meas = get_receive_data();

putc('P', FILTER_CON);
putc(Filter_conf_addr, FILTER_CON);
}
if (rec_data == 'W') {
    putc('W', FILTER_CON);
    for (i=1; i<=11; ++i) {
        while (check_ppc_receive()==0) {}
        putc(get_receive_data(), FILTER_CON);
    }
}
if (rec_data == 'S') output_flag=1;
if (rec_data == 'F') {
    output_flag=0;
    output_flag_o=0;
}
if (rec_data == 'O') {
    while (check_ppc_receive()==0) {}
    Channel0 = get_receive_data();
    amp0_set (1, Channel0);
    delay_ms(delay);
    output_flag_o=1;
    output_flag=1;
}
}

int16 ArrayADC[48];
int16 ADCmin, ADCmax;
int i;
int16 get_ampl()
{
    for (i=0; i<=47; ++i)
        ArrayADC[i]=Get_ADC();

ADCmin=ArrayADC[0];
ADCmax=ArrayADC[0];

    for (i=1; i<=47; ++i) {
        if ((int16) ArrayADC[i]> (int16) ADCmax) (int16) ADCmax = (int16)
ArrayADC[i];
        if ((int16) ArrayADC[i]< (int16) ADCmin) (int16) ADCmin = (int16)
ArrayADC[i];
    }
}

```

Додаток П (продовж. 6)

```

}
return((int16) (ADCmax-ADCmin));

}

void send_data()
{
int16 ADC1, ADC2, ADC3, ADC4, ADC5, ADC6, ADC7, icount, temp;
//int16 ADCData;
int i;
ldiv_t ldiv_rez;

ADC1 = 0;
ADC2 = 0;
ADC3 = 0;
ADC4 = 0;
ADC5 = 0;
ADC6 = 0;
ADC7 = 0;

icount=(int16) Nmb_meas;

    amp0_set (1, 0);
    delay_ms(delay);
    get_ampl();
    for (i=1;i<=icount;++i) ADC1=ADC1+get_ampl();

    amp0_set (1, 1);
    delay_ms(delay);
    get_ampl();
    for (i=1;i<=icount;++i) ADC2=ADC2+get_ampl();

    amp0_set (1, 2);
    delay_ms(delay);
    get_ampl();
    for (i=1;i<=icount;++i) ADC3=ADC3+get_ampl();

    amp0_set (1, 3);
    delay_ms(delay);
    get_ampl();
    for (i=1;i<=icount;++i) ADC4=ADC4+get_ampl();

    amp0_set (1, 4);
    delay_ms(delay);
    get_ampl();
    for (i=1;i<=icount;++i) ADC5=ADC5+get_ampl();

    amp0_set (1, 5);
    delay_ms(delay);
    get_ampl();
    for (i=1;i<=icount;++i) ADC6=ADC6+get_ampl();

    amp0_set (1, 6);
    delay_ms(delay);
    get_ampl();
    for (i=1;i<=icount;++i) ADC7=ADC7+get_ampl();

```

Додаток II

(продовж. 7)

```

    ldiv_rez =ldiv(ADC1, icount);
    ADC1=ldiv_rez.quot;
    ldiv_rez =ldiv(ADC2, icount);
    ADC2=ldiv_rez.quot;
    ldiv_rez =ldiv(ADC3, icount);
    ADC3=ldiv_rez.quot;
    ldiv_rez =ldiv(ADC4, icount);
    ADC4=ldiv_rez.quot;
    ldiv_rez =ldiv(ADC5, icount);
    ADC5=ldiv_rez.quot;
    ldiv_rez =ldiv(ADC6, icount);
    ADC6=ldiv_rez.quot;
    ldiv_rez =ldiv(ADC7, icount);
    ADC7=ldiv_rez.quot;

    ppc_con_transmit_series(ADC1, ADC2, ADC3, ADC4, ADC5, ADC6, ADC7);
    output_flag = 0;
}

void send_data_o()
{
int16 ADC1, ADC2, ADC3, ADC4, ADC5, ADC6, ADC7;
int16 ADCData;
int i;
ldiv_t  ldiv_rez;

ADC1 = 0;
ADC2 = 0;
ADC3 = 0;
ADC4 = 0;
ADC5 = 0;
ADC6 = 0;
ADC7 = 0;
ADCData = 0;

for (i=1;i<=6;++i)
{
    ADCData=ADCData+get_ampl();
}
    ldiv_rez =ldiv(ADCData, 8);
    ADCData=ldiv_rez.quot;

switch (Channel0) {
    case 0:ADC1 = ADCData;
        break;
    case 1:ADC2 = ADCData;
        break;
    case 2:ADC3 = ADCData;
        break;
    case 3:ADC4 = ADCData;
        break;
    case 4:ADC5 = ADCData;
        break;
    case 5:ADC6 = ADCData;
        break;
    case 6:ADC7 = ADCData;

```

Додаток II

(продовж. 8)

```

        break;
    }
    ppc_con_transmit_series(ADC1, ADC2, ADC3, ADC4, ADC5, ADC6, ADC7);
    output_flag = 0;
    output_flag_o = 0;
    //putc('A', PPC_CON);
}

void main()
{
    setup_adc_ports(NO_ANALOGS);
    setup_adc(ADC_OFF);
    setup_psp(PSP_DISABLED);
    setup_spi(SPI_SS_DISABLED);
    setup_timer_0(RTCC_INTERNAL|RTCC_DIV_1);
    setup_timer_1(T1_DISABLED);
    setup_timer_2(T2_DISABLED, 0, 1);
    setup_comparator(NC_NC_NC_NC);
    setup_vref(FALSE);
    delay_ms(100);

    Delay = 4;
    Nmb_meas = 4;

    set_tris_C(0b11010111);
    set_tris_D(0b01001000);

    output_high(CS_ADC);
    output_high(CS_AMP0);
    output_high(CS_AMP1);
    output_high(SPI_CLK);
    output_low(SPI_DO);

    //          9600   19200   57600   115200
    //BAUD0      0       1       0       1
    //BAUD1      0       0       1       1
    // output_high output_low
    output_low(IRDA_BAUD0);
    output_low(IRDA_BAUD1);

    //WriteDeviceID();
    reset_IrDA_dev();

    while (kbhit (PPC_CON)) {fgetc(PPC_CON);}

    //BlinkLed();
    output_flag = 0;

    while (1) {
        if ( check_ppc_receive() ) ppc_con_receive();
        if (output_flag == 1) {
            if (output_flag_o == 1)
                send_data_o();
            else
                send_data();
        }
    }
}

```

Додаток П (продовж. 9)

Програма Filter.c:

```

// команди фільтру
// R<d0>-P<d6> читання еепром і програмування даними фільтра, повертає
// символ R(0x50), <d0>-<d6> - адреси даних (0-6)
// R<d0>-R<d6> читання еепром і пиведення на UART, повертає значення
// параметрів <1M><1FA0><1QA><1FB0><1QB><2M><2FA0><2QA><2FB0><2QB> та
// символ R(0x52)
// W<d0-d6><1M><1FA0><1QA><1FB0><1QB><2M><2FA0><2QA><2FB0><2QB> Запис в EEPROM
// конфігурації фільтра, повертає W (0x57)
// частота генератора 118,8-119 кГц

#include "D:\doks\Univer\Aspirant\pribor\pryjmach\filtr\Firmware\Filter.h"
#include "D:\doks\Univer\Aspirant\pribor\pryjmach\filtr\Firmware\MAX261BCNG.c"

#define LED PIN_B0
#define BYTE PIR1 = 0x0C

void blink_led();
void ProgdamFilterFromEEPROM(unsigned char EEPROM_addes);
void process_p();
void process_w();
void process_r();

unsigned char v1M, v1FA0, v1QA, v1FB0, v1QB, v2M, v2FA0, v2QA, v2FB0, v2QB;

char read_data;
unsigned char EEPROMStartWriteAdress;
unsigned char flag_p, flag_w, flag_r;
unsigned char getc_count;

#INT_RDA
void rs232_receive()
{
    if (flag_p == 1) {
        process_p();
        goto INT_RDA_END;
    }
    if (flag_w == 1) {
        process_w();
        goto INT_RDA_END;
    }

    if (flag_r == 1) {
        process_r();
        goto INT_RDA_END;
    }

    read_data = getc();

    if (read_data == 'P') {
        flag_p = 1;

```

Додаток II

(продовж. 10)

```

} else flag_p = 0;

if (read_data == 'R') {
    flag_r = 1;
} else flag_r = 0;

if (read_data == 'W') {
    flag_w = 1;
    getc_count = 0;
}

INT_RDA_END: ;
}

void process_p() {
    read_data = getc();
    ProgdamFilterFromEEPROM((unsigned char) read_data);
    putc('P');
    flag_p = 0;
}

void process_r() {
    read_data = getc();
    EEPROMStartWriteAddress = read_data * 0x10;
    putc( read_eeprom (EEPROMStartWriteAddress));
    putc( read_eeprom (EEPROMStartWriteAddress+1));
    putc( read_eeprom (EEPROMStartWriteAddress+2));
    putc( read_eeprom (EEPROMStartWriteAddress+3));
    putc( read_eeprom (EEPROMStartWriteAddress+4));
    putc( read_eeprom (EEPROMStartWriteAddress+5));
    putc( read_eeprom (EEPROMStartWriteAddress+6));
    putc( read_eeprom (EEPROMStartWriteAddress+7));
    putc( read_eeprom (EEPROMStartWriteAddress+8));
    putc( read_eeprom (EEPROMStartWriteAddress+9));

    putc('R');
    flag_r = 0;
}

void process_w() {
//blink_led();

    read_data = getc();
    getc_count++;
    switch (getc_count) {
        case 1: EEPROMStartWriteAddress = read_data; break;
        case 2: v1M = read_data; break;
        case 3: v1FA0 = read_data; break;
        case 4: v1QA = read_data; break;
        case 5: v1FB0 = read_data; break;
        case 6: v1QB = read_data; break;
        case 7: v2M = read_data; break;
        case 8: v2FA0 = read_data; break;
        case 9: v2QA = read_data; break;
        case 10: v2FB0 = read_data; break;
        case 11: v2QB = read_data;
                EEPROMStartWriteAddress = EEPROMStartWriteAdress * 0x10;
    }
}

```

Додаток П

(продовж. 11)

```

        write_eeprom (EEPROMStartWriteAddress, v1M);
        write_eeprom (EEPROMStartWriteAddress+1, v1FA0);
        write_eeprom (EEPROMStartWriteAddress+2, v1QA);
        write_eeprom (EEPROMStartWriteAddress+3, v1FB0);
        write_eeprom (EEPROMStartWriteAddress+4, v1QB);
        write_eeprom (EEPROMStartWriteAddress+5, v2M);
        write_eeprom (EEPROMStartWriteAddress+6, v2FA0);
        write_eeprom (EEPROMStartWriteAddress+7, v2QA);
        write_eeprom (EEPROMStartWriteAddress+8, v2FB0);
        write_eeprom (EEPROMStartWriteAddress+9, v2QB);
        flag_w = 0;
        putc('W');
        break;
    }
}

void ProgdamFilterFromEEPROM(unsigned char EEPROM_addes)
{
    EEPROM_addes=EEPROM_addes*0x10;
    v1M = read_eeprom (EEPROM_addes);
    v1FA0 = read_eeprom (EEPROM_addes+1);
    v1QA = read_eeprom (EEPROM_addes+2);
    v1FB0 = read_eeprom (EEPROM_addes+3);
    v1QB = read_eeprom (EEPROM_addes+4);
    v2M = read_eeprom (EEPROM_addes+5);
    v2FA0 = read_eeprom (EEPROM_addes+6);
    v2QA = read_eeprom (EEPROM_addes+7);
    v2FB0 = read_eeprom (EEPROM_addes+8);
    v2QB = read_eeprom (EEPROM_addes+9);
    SetFilter(RW1, v1M, v1FA0, v1QA, v1FB0, v1QB);
    SetFilter(RW2, v2M, v2FA0, v2QA, v2FB0, v2QB);
}

void blink_led()
{
    int i;
    for (i=1;i<=5;++i)
    {
        delay_ms(300);
        output_low(LED);
        delay_ms(300);
        output_high(LED);
    }
}

void main()
{
    setup_timer_0(RTCC_INTERNAL|RTCC_DIV_1);
    setup_timer_1(T1_DISABLED);
    setup_timer_2(T2_DISABLED,0,1);
    setup_comparator(NC_NC_NC_NC);
    setup_vref(FALSE);

    enable_interrupts(INT_RDA);

```

Додаток П
(продовж. 12)

```
enable_interrupts(GLOBAL);  
  
blink_led();  
  
InitFilter();  
//putc('A');  
  
while (kbhit()) getc();  
  
while (TRUE) {  
    //if(kbhit()) rs232_receive();  
    delay_us (100);  
}  
}
```

Додаток Р

Програма розрахунку похибки способу визначення сили струму в стінці одного трубопроводу системою КІ-1 з використанням п'яти магнітних антен (1-й спосіб)

```
> restart;
```

$$Is1 := \frac{2 \pi Ux2 kz2 b Uz1^2 ky1^2 Ux1^2 \left(1 + \frac{kx1^2 Uy1^2 \left(1 + \frac{Uz1^2 ky1^2}{Uy1^2 kz1^2} \right)}{ky1^2 Ux1^2} \right)}{Uy1^2 kz1 \left(1 + \frac{Uz1^2 ky1^2}{Uy1^2 kz1^2} \right) (-Uz1 kx1 Ux2 kz2 + kz1 Ux1 kx2 Uz2) \mu0 kx1}$$

$$Is1 := \frac{2 \pi Ux2 kz2 b Uz1^2 ky1^2 Ux1^2 \left(1 + \frac{kx1^2 Uy1^2 \left(1 + \frac{Uz1^2 ky1^2}{Uy1^2 kz1^2} \right)}{ky1^2 Ux1^2} \right)}{Uy1^2 kz1 \left(1 + \frac{Uz1^2 ky1^2}{Uy1^2 kz1^2} \right) (-Uz1 kx1 Ux2 kz2 + kz1 Ux1 kx2 Uz2) \mu0 kx1} \quad (1)$$

$$Is2 := \frac{2 \pi Ux2 kz2 b Uz1^2 ky1^2 Ux1^2 \left(1 + \frac{kx1^2 Uy1^2 \left(1 + \frac{Uz1^2 ky1^2}{Uy1^2 kz1^2} \right)}{ky1^2 Ux1^2} \right)}{Uy1^2 kz1 \left(1 + \frac{Uz1^2 ky1^2}{Uy1^2 kz1^2} \right) (Uz1 kx1 Ux2 kz2 + kz1 Ux1 kx2 Uz2) \mu0 kx1}$$

$$Is2 := \frac{2 \pi Ux2 kz2 b Uz1^2 ky1^2 Ux1^2 \left(1 + \frac{kx1^2 Uy1^2 \left(1 + \frac{Uz1^2 ky1^2}{Uy1^2 kz1^2} \right)}{ky1^2 Ux1^2} \right)}{Uy1^2 kz1 \left(1 + \frac{Uz1^2 ky1^2}{Uy1^2 kz1^2} \right) (Uz1 kx1 Ux2 kz2 + kz1 Ux1 kx2 Uz2) \mu0 kx1} \quad (2)$$

$$\Delta Is1 := \left(\frac{d}{d Ux1} Is1 \right) \cdot \Delta U + \left(\frac{d}{d Ux2} Is1 \right) \cdot \Delta U + \left(\frac{d}{d Uz1} Is1 \right) \cdot \Delta U + \left(\frac{d}{d Uz2} Is1 \right) \cdot \Delta U$$

$$+ \left(\frac{d}{d Uy1} Is1 \right) \cdot \Delta U + \left(\frac{d}{d b} Is1 \right) \cdot \Delta b + \left(\frac{d}{d kx1} Is1 \right) \cdot \Delta kx1 + \left(\frac{d}{d kx2} Is1 \right) \cdot \Delta kx2$$

$$+ \left(\frac{d}{d kz1} Is1 \right) \cdot \Delta kz1 + \left(\frac{d}{d kz2} Is1 \right) \cdot \Delta kz2 + \left(\frac{d}{d ky1} Is1 \right) \cdot \Delta ky1 :$$

$$\Delta Is2 := \left(\frac{d}{d Ux1} Is2 \right) \cdot \Delta U + \left(\frac{d}{d Ux2} Is2 \right) \cdot \Delta U + \left(\frac{d}{d Uz1} Is2 \right) \cdot \Delta U + \left(\frac{d}{d Uz2} Is2 \right) \cdot \Delta U$$

$$+ \left(\frac{d}{d Uy1} Is2 \right) \cdot \Delta U + \left(\frac{d}{d b} Is2 \right) \cdot \Delta b + \left(\frac{d}{d kx1} Is2 \right) \cdot \Delta kx1 + \left(\frac{d}{d kx2} Is2 \right) \cdot \Delta kx2$$

$$+ \left(\frac{d}{d kz1} Is2 \right) \cdot \Delta kz1 + \left(\frac{d}{d kz2} Is2 \right) \cdot \Delta kz2 + \left(\frac{d}{d ky1} Is2 \right) \cdot \Delta ky1 :$$

Додаток С
(продовж. 1)

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^m (a_{j,1} \cdot x_1 \cdot a_{j,1}) + \sum_{j=1}^m (a_{j,2} \cdot x_2 \cdot a_{j,1}) + \sum_{j=1}^m (a_{j,3} \cdot x_3 \cdot a_{j,1}) - \sum_{j=1}^m (b_j \cdot a_{j,1}) \\ & \sum_{j=1}^m (a_{j,1} \cdot x_1 \cdot a_{j,2}) + \sum_{j=1}^m (a_{j,2} \cdot x_2 \cdot a_{j,2}) + \sum_{j=1}^m (a_{j,3} \cdot x_3 \cdot a_{j,2}) - \sum_{j=1}^m (b_j \cdot a_{j,2}) \\ & \sum_{j=1}^m (a_{j,1} \cdot x_1 \cdot a_{j,3}) + \sum_{j=1}^m (a_{j,2} \cdot x_2 \cdot a_{j,3}) + \sum_{j=1}^m (a_{j,3} \cdot x_3 \cdot a_{j,3}) - \sum_{j=1}^m (b_j \cdot a_{j,3}) \end{aligned}$$

$$M = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^m (a_{j,1} \cdot a_{j,1}) & \sum_{j=1}^m (a_{j,2} \cdot a_{j,1}) & \sum_{j=1}^m (a_{j,3} \cdot a_{j,1}) \\ \sum_{j=1}^m (a_{j,1} \cdot a_{j,2}) & \sum_{j=1}^m (a_{j,2} \cdot a_{j,2}) & \sum_{j=1}^m (a_{j,3} \cdot a_{j,2}) \\ \sum_{j=1}^m (a_{j,1} \cdot a_{j,3}) & \sum_{j=1}^m (a_{j,2} \cdot a_{j,3}) & \sum_{j=1}^m (a_{j,3} \cdot a_{j,3}) \end{bmatrix} \quad M = \begin{pmatrix} 11 & -1.042 & 3.214 \\ -1.042 & 0.123 & -0.412 \\ 3.214 & -0.412 & 1.497 \end{pmatrix}$$

$$M1 = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^m (b_j \cdot a_{j,1}) & \sum_{j=1}^m (a_{j,2} \cdot a_{j,1}) & \sum_{j=1}^m (a_{j,3} \cdot a_{j,1}) \\ \sum_{j=1}^m (b_j \cdot a_{j,2}) & \sum_{j=1}^m (a_{j,2} \cdot a_{j,2}) & \sum_{j=1}^m (a_{j,3} \cdot a_{j,2}) \\ \sum_{j=1}^m (b_j \cdot a_{j,3}) & \sum_{j=1}^m (a_{j,2} \cdot a_{j,3}) & \sum_{j=1}^m (a_{j,3} \cdot a_{j,3}) \end{bmatrix} \quad M1 = \begin{pmatrix} 2.897 & -1.042 & 3.214 \\ -0.374 & 0.123 & -0.412 \\ 1.432 & -0.412 & 1.497 \end{pmatrix}$$

$$M2 = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^m (a_{j,1} \cdot a_{j,1}) & \sum_{j=1}^m (b_j \cdot a_{j,1}) & \sum_{j=1}^m (a_{j,3} \cdot a_{j,1}) \\ \sum_{j=1}^m (a_{j,1} \cdot a_{j,2}) & \sum_{j=1}^m (b_j \cdot a_{j,2}) & \sum_{j=1}^m (a_{j,3} \cdot a_{j,2}) \\ \sum_{j=1}^m (a_{j,1} \cdot a_{j,3}) & \sum_{j=1}^m (b_j \cdot a_{j,3}) & \sum_{j=1}^m (a_{j,3} \cdot a_{j,3}) \end{bmatrix} \quad M2 = \begin{pmatrix} 11 & 2.897 & 3.214 \\ -1.042 & -0.374 & -0.412 \\ 3.214 & 1.432 & 1.497 \end{pmatrix}$$

$$M3 = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^m (a_{j,1} \cdot a_{j,1}) & \sum_{j=1}^m (a_{j,2} \cdot a_{j,1}) & \sum_{j=1}^m (b_j \cdot a_{j,1}) \\ \sum_{j=1}^m (a_{j,1} \cdot a_{j,2}) & \sum_{j=1}^m (a_{j,2} \cdot a_{j,2}) & \sum_{j=1}^m (b_j \cdot a_{j,2}) \\ \sum_{j=1}^m (a_{j,1} \cdot a_{j,3}) & \sum_{j=1}^m (a_{j,2} \cdot a_{j,3}) & \sum_{j=1}^m (b_j \cdot a_{j,3}) \end{bmatrix} \quad M3 = \begin{pmatrix} 11 & -1.042 & 2.897 \\ -1.042 & 0.123 & -0.374 \\ 3.214 & -0.412 & 1.432 \end{pmatrix}$$

Додаток С
(продовж. 2)

$$D \approx |M| \quad D1 \approx |M1| \quad D2 \approx |M2| \quad D3 \approx |M3|$$

$$D = 0.022 \quad D1 = 2.107 \times 10^{-3} \quad D2 = 0.079 \quad D3 = 0.038$$

$$x_1 = \frac{D1}{D} \quad x_2 = \frac{D2}{D} \quad x_3 = \frac{D3}{D}$$

$$x_1 = 0.096 \quad x_2 = 3.623 \quad x_3 = 1.747$$

$$\text{Suma } v := \sum_{j=1}^m \left[\left[\sum_{i=1}^3 (a_{j,i} \cdot x_i) - b_j \right]^2 \right]$$

$$\text{Suma } v = 9.747 \times 10^{-5}$$

$$A11 = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^m (a_{j,2} \cdot a_{j,2}) & \sum_{j=1}^m (a_{j,3} \cdot a_{j,2}) \\ \sum_{j=1}^m (a_{j,2} \cdot a_{j,3}) & \sum_{j=1}^m (a_{j,3} \cdot a_{j,3}) \end{bmatrix} \quad A11 = \begin{pmatrix} 0.123 & -0.412 \\ -0.412 & 1.497 \end{pmatrix} \quad |A11| = 0.014$$

$$A22 = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^m (a_{j,1} \cdot a_{j,1}) & \sum_{j=1}^m (a_{j,3} \cdot a_{j,1}) \\ \sum_{j=1}^m (a_{j,1} \cdot a_{j,3}) & \sum_{j=1}^m (a_{j,3} \cdot a_{j,3}) \end{bmatrix} \quad A22 = \begin{pmatrix} 11 & 3.214 \\ 3.214 & 1.497 \end{pmatrix} \quad |A22| = 6.142$$

$$A33 = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^m (a_{j,1} \cdot a_{j,1}) & \sum_{j=1}^m (a_{j,2} \cdot a_{j,1}) \\ \sum_{j=1}^m (a_{j,1} \cdot a_{j,2}) & \sum_{j=1}^m (a_{j,2} \cdot a_{j,2}) \end{bmatrix} \quad A33 = \begin{pmatrix} 11 & -1.042 \\ -1.042 & 0.123 \end{pmatrix} \quad |A33| = 0.268$$

$$\sigma_{x1} = \sqrt{\frac{\text{Suma } v \cdot |A11|}{(m-3) \cdot D}} \quad \sigma_{x2} = \sqrt{\frac{\text{Suma } v \cdot |A22|}{(m-3) \cdot D}} \quad \sigma_{x3} = \sqrt{\frac{\text{Suma } v \cdot |A33|}{(m-3) \cdot D}}$$

$$\sigma_{x1} = 2.825 \times 10^{-3} \quad \sigma_{x2} = 0.058 \quad \sigma_{x3} = 0.012$$

$$Kp \approx 2.31$$

$$\Delta x1 \approx Kp \cdot \sigma_{x1} \quad \Delta x2 \approx Kp \cdot \sigma_{x2} \quad \Delta x3 \approx Kp \cdot \sigma_{x3}$$

$$\Delta x1 = 6.525 \times 10^{-3} \quad \Delta x2 = 0.135 \quad \Delta x3 = 0.028$$

$$d \approx x_3 \quad \Delta d \approx \Delta x3$$

$$d = 1.747 \quad \Delta d = 0.028$$

$$z = \sqrt{x_2 - (x_3)^2} \quad z = 0.755$$

Додаток С
(продовж. 3)

$$x_1 = x_1 \quad x_2 = x_2 \quad x_3 = x_3$$

$$\Delta z = \Delta x_2 \left[\frac{d}{dx_2} \sqrt{x_2 - (x_3)^2} \right] + \Delta x_3 \left[\frac{d}{dx_3} \sqrt{x_2 - (x_3)^2} \right]$$

$$I = \frac{x_1}{\sqrt{x_2 - (x_3)^2}}$$

$$\Delta I = \Delta x_1 \cdot \left(\frac{d}{dx_1} \frac{x_1}{\sqrt{x_2 - x_3^2}} \right) + \Delta x_2 \cdot \left(\frac{d}{dx_2} \frac{x_1}{\sqrt{x_2 - x_3^2}} \right) + \Delta x_3 \cdot \left(\frac{d}{dx_3} \frac{x_1}{\sqrt{x_2 - x_3^2}} \right)$$

Додаток Т.1

Методика лабораторних випробувань системи КІ-1

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заст. каф МПКЯ і СП

ІФНТУНГ

проф. Середюк О. Є. « 23 » 08 2009 р. 

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИБАДУ КІ-1

Методика лабораторних випробувань

Івано-Франківськ, 2009 р.

Додаток Т.1 (продовж. 1)

Методика лабораторних випробувань призначена для проведення випробувань технічних характеристик та методик визначення інформативних параметрів за допомогою системи КІ-1 при безконтактному визначенні струмів в стінках підземних трубопроводів. Методика розроблена на кафедрі "Методи та прилади контролю якості" (МПКЯ і СП) Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

1. Мета лабораторних випробувань

Мета лабораторних випробувань полягає у перевірці заявлених характеристик системи КІ-1 та методик обробки і отримання інформації з її допомогою.

2. Технічний засіб для визначення інформативних параметрів в процесі безконтактного визначення струмів в стінках підземних трубопроводів

2.1. В якості технічного засобу для визначення струмів в стінках підземних трубопроводів використовується система контролю КІ-1.

2.2. Технічні характеристики генератора КІ-1-Г:

- вихідна потужність	40 Вт
- діапазон робочих частот	500 – 1500 Гц
- крок задання робочої частоти	1 Гц
- похибка задання частоти	не більше 0,2 Гц
- час роботи генератора в режимі максимального навантаження	до 4 год

3. Методика проведення досліджень вихідних характеристик генератора КІ-1-Г

Додаток Т.1
(продовж. 2)

- 3.1. Перед проведенням випробувань акумуляторна батарея має бути повністю зарядженою.
- 3.2. Ввімкнути генератор та прогріти його протягом 15 хв.
- 3.3. Встановити робочу частоту 500 Гц.
- 3.4. Під'єднати підстроювальний резистор типу СІІ з опором 200 Ом та вимірювальні прилади згідно рис. 3.1.

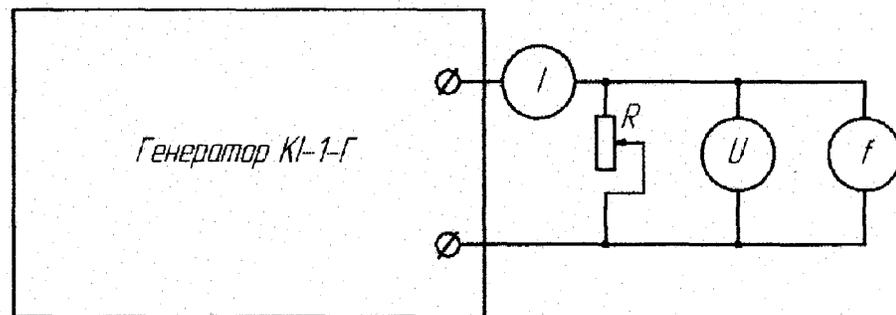


Рис. 3.1. Схема установки для перевірки роботи генератора КІ-1-Г

- 3.5. Встановити регулятором узгодження на генераторі вихідну напругу 80 В.
- 3.6. Встановити шляхом переміщення повзунка резистора R потужність споживання 40 Вт, яка визначається із залежності:

$$P = UI. \quad (3.1)$$

- 3.7. Реєструвати значення струму, напруги та частоти в протокол випробувань через кожні 30 хв. протягом 4 год.
- 3.8. Повторити пункти 3.1 – 3.7 для робочих частот 1000 та 1500 Гц.

4. Методика проведення лабораторних випробувань системи КІ-1

- 4.1. Для виконання лабораторних випробувань системи КІ-1 використовується установка, яка зображена на рис. 4.1.

Додаток Т.1
(продовж. 3)

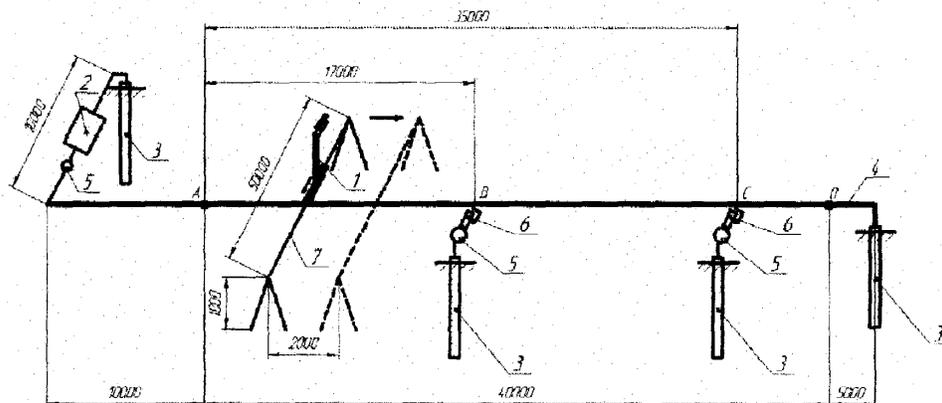


Рис. 4.1. Схема установки для перевірки роботи системи КІ-1: 1 – приймач КІ-1-П; 2 – генератор КІ-1-Г; 3 – виносне заземлення; 4 – ізолюваний провідник; 5 – міліамперметр змінного струму; 6 – підстроювальний резистор; 7 – механічна опора

4.2. Ввімкнути та прогріти генератор КІ-1-Г та приймач КІ-1-П протягом 15 хв.

4.3. Встановити робочу частоту генератора 868 Гц.

4.4. Під'єднати навантаження до генератора та шляхом регулювання узгодження встановити струм на виході генератора 150 мА.

4.5. Під'єднати навантаження в точках В та С та підстроювальними резисторами виставити струми стікання відповідно 100 мА та 25 мА.

4.6. Механічну опору 7 встановити в точці А, так, щоб вона була перпендикулярною до провідника 4 і її центр знаходився над цим провідником.

4.7. Встановити приймач КІ-1-П в довільному місці на механічній опорі із його повертанням відносно лінії, перпендикулярної до провідника на довільний кут в межах $\pm 45^\circ$ і здійснити однократне вимірювання сили струму в провіднику.

4.8. Здійснити плавне переміщення приймача в режимі вимірювання по механічній опорі з однієї її сторони на іншу. Визначити силу струму в

Додаток Т.1
(продовж. 4)

провіднику за допомогою штучної нейронної мережі та способу обробки надлишкових даних з використанням умовно-нормальних рівнянь.

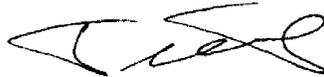
4.9. Визначені дані занести в протокол випробувань.

5. ОФОРМЛЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИПРОБУВАНЬ

5.1. Всі результати випробувань повинні бути оформлені в протоколі випробувань.

5.2. На основі протоколів випробувань оформляється акт лабораторних випробувань.

Виконавець



Б. В. Костів

Додаток Т.2

Протокол проведення лабораторних випробувань ситеми КІ-1

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заст. каф МПКЯ і СП

ІФНТУНГ

проф. Середюк О. Є.

«23» 09 2009 р.

ПРОТОКОЛ

проведення лабораторних випробувань системи безконтактного визначення струмів за допомогою системи КІ-1

1. Випробування проводилося 8.09.2009р. згідно з методикою лабораторних випробувань «Дослідження технічних характеристик приладу КІ-1».

2. Визначення характеристик генератора КІ-1-Г.

Таблиця 2.1.

Результати визначення характеристик генератора КІ-1-Г

Час, хв	Роб. частота, Гц	Реальна частота, Гц	Пох. частоти, Гц	U, В	I, А	P, Вт
1	2	3	4	5	6	7
0	500	499,84	-0,16	78,92	0,501	39,58
30	500	499,82	-0,18	79,73	0,500	39,89
60	500	500,01	0,01	79,77	0,498	39,75
90	500	500,11	0,11	80,81	0,498	40,30
120	500	500,17	0,17	79,55	0,501	39,93
150	500	499,85	-0,15	81,20	0,497	40,41
180	500	500,02	0,02	79,37	0,499	39,68
210	500	499,99	-0,01	79,79	0,498	39,76
240	500	499,81	-0,19	78,91	0,502	39,64
0	1000	999,93	-0,07	79,10	0,501	39,63
30	1000	999,86	-0,14	80,73	0,500	40,36
60	1000	1000,11	0,11	80,18	0,499	40,07
90	1000	999,92	-0,08	80,45	0,497	40,04
120	1000	1000,01	0,01	79,14	0,500	39,64
150	1000	999,86	-0,14	81,07	0,497	40,35
180	1000	1000,04	0,04	80,58	0,497	40,12
210	1000	999,90	-0,10	79,68	0,500	39,85
240	1000	1000,06	0,06	80,35	0,497	40,01
0	1500	1500,07	0,075	79,55	0,501	39,90

Додаток Т.2
(продовж. 1)

Продовження табл. 2.1.

1	2	3	4	5	6	7
30	1500	1500,09	0,09	78,90	0,501	39,57
60	1500	1499,98	-0,02	79,30	0,501	39,73
90	1500	1499,83	-0,17	79,52	0,498	39,62
120	1500	1499,89	-0,11	79,24	0,500	39,68
150	1500	1500,16	0,16	79,46	0,500	39,73
180	1500	1499,86	-0,14	79,45	0,502	39,91
210	1500	1500,13	0,13	78,98	0,500	39,54
240	1500	1500,01	0,01	80,56	0,501	40,40

3. Дослідження роботи приймача КІ-1-П.

Частота контролю – 868 Гц;

Струм на вході моделі трубопроводу – 284,5 мА;

Струм зникання в точці В - 100,3 мА;

Струм зникання в точці С - 25,02 мА;

Таблиця 3.1.

Результати вимірювання струму на моделі трубопроводу

Відстань, м	I, А	Результати обчислень при однократних вимірюваннях (1-а методика)		Результати обчислень з використанням штучних нейронних мереж (2-а методика)		Результати обчислень з вико- ристанням мето- дики обробки над- лишкових даних (3-я методика)	
		I, А	δ_j , %	I, А	δ_j , %	I, А	δ_j , %
1	2	3	4	5	6	7	8
0	284,4	291,5	2,51	288,7	1,51	288,5	1,40
2	284,5	295,8	4,00	290,0	1,89	284,6	0,04
4	284,4	296,8	4,24	278,7	1,90	287,6	1,15
6	284,4	276,2	2,84	288,5	1,46	285,1	0,26
8	284,5	274,9	3,34	285,7	0,45	281,5	1,03
10	284,5	289,6	1,81	290,0	1,88	281,9	0,90
12	284,4	273,7	3,75	284,7	0,11	283,6	0,27
14	284,5	285,1	0,23	284,2	0,08	286,6	0,74
16	284,4	285,1	0,28	287,8	1,20	287,1	0,97
18	184,5	190,6	3,34	182,4	1,08	186,1	0,86
20	184,5	184,2	0,14	184,4	0,01	183,4	0,54
22	184,5	182,6	0,98	187,4	1,60	184,6	0,10
24	184,5	187,4	1,58	185,0	0,29	182,2	1,23
26	184,4	188,5	2,23	186,9	1,38	182,2	1,16

Додаток Т.2
(продовж. 2)

Продовження табл. 3.1.

1	2	3	4	5	6	7	8
28	184,4	184,7	0,18	186,1	0,95	182,3	1,09
30	184,5	181,9	1,40	185,1	0,34	185,4	0,53
32	184,4	178,4	3,23	182,5	1,01	184,3	0,01
34	184,4	185,8	0,79	185,6	0,66	182,6	0,93
36	159,4	155,8	2,20	156,7	1,66	159,3	0,01
38	159,5	152,7	4,21	160,3	0,50	157,8	1,05
40	159,4	163,1	4,25	160,4	0,64	157,2	1,33

За результатами проведених лабораторних випробувань було встановлено, що характеристики генератора КІ-І-Г відповідають заявленим.

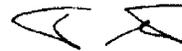
На основі аналізу результатів лабораторних випробувань було встановлено, що максимальна відносна похибка системи КІ-І при визначенні струму 1-ою методикою складає 4,25 %, 2-ою методикою — 1,9%, 3-ою методикою — 1,4%.

Доц. каф. МПКЯ і СП



Ю.Й.Стрілецький

Асист. каф МПКЯ і СП

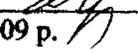


Б.В. Костів

Додаток Т.3

Акт про виконання лабораторних випробувань системи КІ-1

ЗАТВЕРДЖУЮ
Заст. каф МПКЯ і СП
ІФНГУНГ

проф. Середюк О. Є. 
« 13 » 03 2009 р. 

АКТ

про виконання лабораторних випробувань приладу КІ-1

Ми, що нижче підписалися, доцент каф МПКЯ і СП, к.т.н. Стрілецький Ю. Й. та асист. каф. МПКЯ і СП Костів Б. В. склали даний акт про те, що були проведені лабораторні випробування з визначення технічних характеристик системи КІ-1.

За результатами випробувань було встановлено, що технічні характеристики відповідають заявленим і необхідно провести подальші дослідження на реальних трубопроводах.

Додаток: Протокол проведення лабораторних випробувань системи КІ-1

Доц. каф. МПКЯ і СП



Ю.Й.Стрілецький

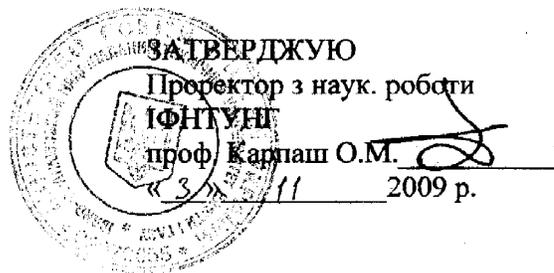
Асист каф. МПКЯ і СП



Б.В.Костів

Додаток У.1

Методика польових випробувань системи КІ-1



ТЕХНОЛОГІЯ БЕЗКОНТАКТНОГО ВИЗНАЧЕННЯ СТРУМУ В СТИНЦІ
ПІДЗЕМНОГО ТРУБOPPOВODУ ДЛЯ ОЦІНКИ ЙОГО ІЗОЛЯЦІЙНОГО
ПОКРИТТЯ

Методика польових випробувань

ПОГОДЖЕНО
Доц. каф. ТД і М
ІФНТУНГ
к.т.н. Яворський А.В.
« 2 » 11 2009 р.

Івано-Франківськ, 2009 р.

Додаток У.1 (продовж. 1)

Методика польових випробувань призначена для оцінки можливостей системи КІ-1 щодо виявлення пошкоджень ізоляційного покриття підземного трубопроводу. Методика розроблена на кафедрі "Методи та прилади контролю якості" (МПКЯ і СП) Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

1. Мета польових випробувань

Мета польових випробувань полягає у перевірці роботи методик безконтактного визначення струму в стінках підземного трубопроводу з метою оцінки його ізоляційного покриття з використанням системи КІ-1.

2. Технічний засіб для визначення інформативних параметрів в процесі безконтактного визначення струмів в стінках підземних трубопроводів

2.1. В якості технічного засобу для визначення струмів в стінках підземних трубопроводів використовується система контролю КІ-1.

3. Місце проведення випробувань

3.1. Випробування повинні проходити на навчальному полігоні каф. "Технічна діагностика і моніторинг" (ТД і М) ІФНТУНГ.

3.2. Під час проведення випробувань необхідно досліджувати металевий трубопровід, з наперед відомими місцями пошкодженнями його ізоляційного покриття.

4. Методика проведення польових випробувань.

Додаток У.1
(продовж. 2)

4.1. При проведенні польових випробувань значення струму в стінці підземного трубопроводу необхідно визначати за умовно-нормальних рівнянь системи КІ-1.

4.2. Виконання польових випробувань відбувається згідно схеми приведеної на рис. 4.1.

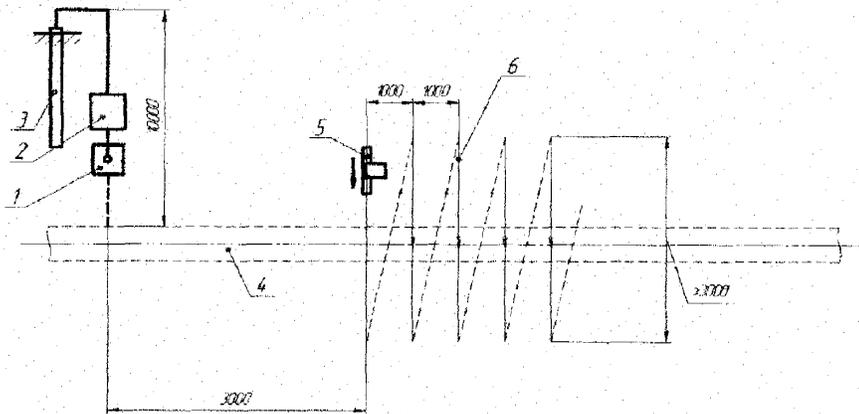


Рис. 4.1. Схема проведення польових випробувань: 1-контрольно-вимірювальна колонка №2; 2-генератор КІ-1-Г; 3-заземлення; 4-трубопровід; 5-приймач КІ-1-П; 6-маршрут руху оператора

4.3. Ввімкнути та прогріти генератор КІ-1-Г та приймач КІ-1-П протягом 15 хв.

4.4. Встановити робочу частоту генератора 868 Гц.

4.5. Під'єднати генератор до контрольно-вимірювальної колонки №2 та заземлення, розмістити вказані з'єднувальні лінії перпендикулярно до осі трубопроводу.

4.6. Шляхом узгодження генератора із трубопроводом встановити струм в ньому 350 мА.

4.7. Розмістити приймач КІ-1-П на відстані 3 м від місця під'єднання генератора згідно рис. 4.1.

Додаток У.1

(продовж. 3)

4.8. Виконати проходження із приймачем в режимі вимірювання через вісь трубопроводу перпендикулярно до неї. Контроль відхилення від маршруту проходження над віссю трубопроводу в перпендикулярному напрямку відслідковується за показами портативного комп'ютера системи КІ-1.

4.9. При наявності відхилень від заданого напрямку при проходженні через вісь трубопроводу процес вимірювання слід повторити.

4.10. Встановити приймач на віддалі 1 м від попередньої точки початку вимірювань згідно рис. 4.1. та виконати вимірювання згідно п.4.6-4.7.

4.11. Повторити виконання п.4.10 для дослідження всієї ділянки трубопроводу (19 м) через кожний метр.

4.12. Визначені за допомогою профілів напруженостей значення сили струмів в стінці контрольованого трубопроводу занести в протокол випробувань та визначити затухання цих струмів згідно залежності:

$$\alpha = \frac{2000}{\Delta l} \left| \lg \left(\frac{I_{n+1}}{I_n} \right) \right|, \quad (4.1)$$

де I_n, I_{n+1} - виміряна сила струму в двох сусідніх точках трубопроводу,

Δl - відстань між цими точками.

5. ОФОРМЛЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИПРОБУВАНЬ

5.1. Всі результати випробувань повинні бути оформлені в протоколі випробувань.

5.2. На основі протоколів випробувань оформляється акт польових випробувань.

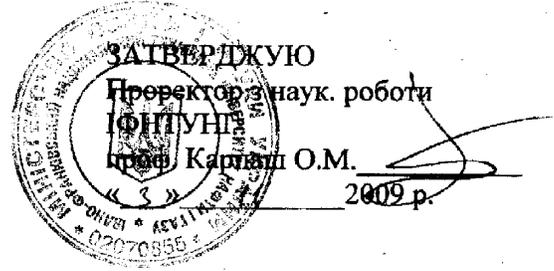
Виконавець



Б. В. Костів

Додаток У.2

Протокол проведення польових випробувань системи КІ-1



ПРОТОКОЛ

проведення польових випробувань системи КІ-1 безконтактного визначення струму в стінці підземного трубопроводу для оцінки його ізоляційного покриття

1. Випробування проводилося 2.11.2009р. згідно з методикою польових випробувань «Технологія безконтактного визначення струму в стінці підземного трубопроводу для оцінки його ізоляційного покриття» на навчальному полігоні каф. ТД і М ІФНТУНГ.

2. Визначення струму вздовж контрольованого трубопроводу

Частота контролю – 868 Гц;

Струм на вході трубопроводу – 350 мА;

Таблиця 2.1.

Результати визначення струмів системою КІ-1 з використанням умовно-нормальних рівнянь

Номер вимірювання	1	2	3	4	5	6	7
I, A	0,2919	0,3221	0,3274	0,2874	0,2893	0,2667	0,2462
$l, м$	0	1	2	3	4	5	6
Номер вимірювання	8	9	10	11	12	13	14
I, A	0,2234	0,2187	0,2078	0,1971	0,1580	0,1421	0,1172
$l, м$	7	8	9	10	11	12	13
Номер вимірювання	15	16	17	18	19	20	
I, A	0,1078	0,0963	0,0868	0,0749	0,0665	0,0809	
$l, м$	14	15	16	17	18	19	

Додаток У.2
(продовж. 1)

Таблиця 2.2.

Зникання струму вздовж трубопроводу визначені з використанням умовно-нормальних рівнянь системи КІ-1

$l, \text{ м}$	1	2	3	4	5	6	7
$\alpha, \text{ мБ/м}$	42,75	7,02	56,50	2,85	35,41	34,63	42,34
$l, \text{ м}$	8	9	10	11	12	13	14
$\alpha, \text{ мБ/м}$	9,05	22,38	22,85	96,12	45,92	83,58	36,47
$l, \text{ м}$	15	16	17	18	19		
$\alpha, \text{ мБ/м}$	48,88	45,07	63,94	51,38	84,78		

За результатами проведених польових випробувань було встановлено дві ділянки значного зникання струму на відстані 11 м та 13 м від точки початку обстеження з наперед відомими місцями пошкодженнями ізоляційного покриття трубопроводу. Високе значення зникання струму вздовж всієї ділянки трубопроводу пояснюється великою вологістю ґрунту.

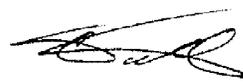
На початку трубопроводу на відстані до 4 м спостерігалось спотворення сигналу вхідними колами приймача і тому визначені дані на вказаній ділянці можуть бути недостовірними.

Доц. каф. ТД і М



А.В. Яворський

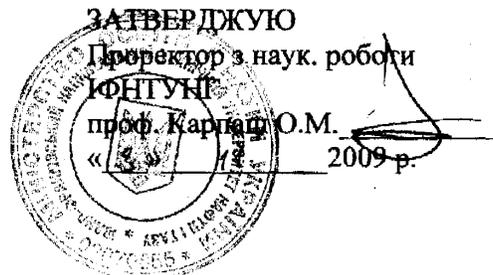
Асист. каф МПКЯ і СП



Б.В. Костів

Додаток У.3

Акт про виконання польових випробувань системи КІ-1



АКТ

про виконання польових випробувань приладу КІ-1

Ми, що нижче підписалися, доцент каф. ТД і М, к.т.н. Яворський А. В. та асист. каф. МПКЯ і СП Костів Б. В. склали даний акт про те, що були проведені польові випробування системи КІ-1 на навчальному полігоні каф. ТД і М ІФНТУНГ.

За результатами випробувань було виявлено, два місця значного витікання струму: на відстані 11 м та 13 м від точки початку обстеження, тобто в місцях з наперед відомими місцями пошкодженнями ізоляційного покриття трубопроводу, що підтвердило працездатність системи КІ-1 і методик з використанням нейронних мереж і умовно-нормальних рівнянь.

Додаток: Протокол проведення польових випробувань системи КІ-1

Доц. каф. ТД і М

А.В. Яворський

Асист каф. МПКЯ і СП

Б.В. Костів

Додаток Ф.1

Методика промислових випробувань системи КІ-1 в УМГ
«Прикарпаттрансгаз»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Головний інженер
УМГ «Прикарпаттрансгаз»

Ковалів Г. О.
2009 р.



ТЕХНОЛОГІЯ БЕЗКОНТАКТНОГО ВИЗНАЧЕННЯ СТРУМУ В СТІНЦІ
ПІДЗЕМНОГО ТРУБОПРОВОДУ ДЛЯ ОЦІНКИ ЙОГО ІЗОЛЯЦІЙНОГО
ПОКРИТТЯ

Методика промислових випробувань

ПОГОДЖЕНО

Начальник ВД
УМГ «Прикарпаттрансгаз»
Степанець

«07»



Івано-Франківськ
2009 р.

Додаток Ф.1

(продовж. 1)

Методика промислових випробувань призначена для проведення випробувань способу визначення струму в підземному трубопроводі з використанням нейронних мереж системи КІ-1. Методика розроблена на кафедрі "Методи та прилади контролю якості і сертифікації продукції" (МПКЯ і СІ) Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (ІФНТУНГ).

1. Мета промислових випробувань

Мета промислових випробувань полягає у перевірці роботи способу визначення струму в стінці підземного трубопроводу з використанням нейронних мереж системи КІ-1.

2. Технічний засіб для визначення інформативних параметрів в процесі безконтактного визначення струмів в стінках підземних трубопроводів

2.1. В якості технічного засобу для контролю ізоляційного покриття підземних трубопроводів використовується система КІ-1.

3. Місце проведення випробувань

3.1. Випробування повинні проходити на підвідному газопроводі діаметром 1420 мм компресорної станції "Богородчани".

4. Методика проведення промислових випробувань.

4.1. Виконання промислових випробувань відбувається згідно схеми, приведеної на рис. 4.1.

Додаток Ф.1

(продовж. 2)

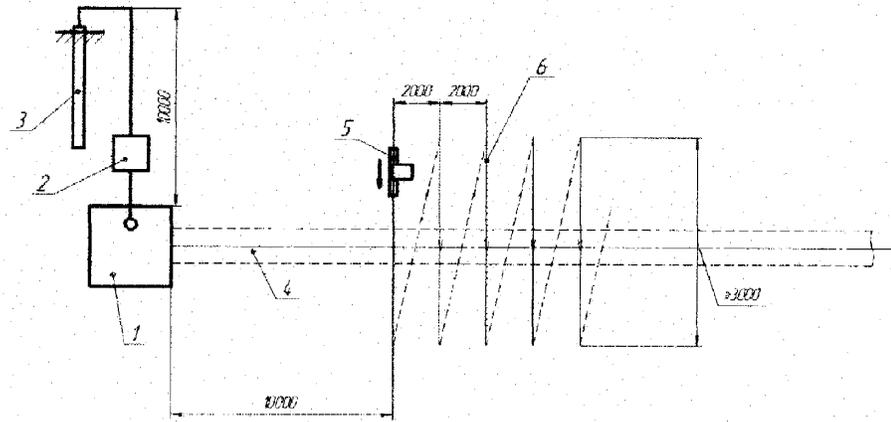


Рис. 4.1. Схема проведення промислових випробувань: 1-крановий вузол; 2-генератор КІ-1-Г; 3-виносне заземлення; 4-трубопровід; 5-приймач КІ-1-П; 6-маршрут руху оператора

4.2. Ввімкнути та прогріти генератор КІ-1-Г та приймач КІ-1-П протягом 15 хв.

4.3. Встановити роботу частоту генератора 868 Гц.

4.4. Встановити виносне заземлення та під'єднати генератор до заземлення та кранового вузла таким чином, щоб з'єднувальні провідники були перпендикулярні до осі трубопроводу.

4.5. Шляхом узгодження генератора із трубопроводом встановити струм в підвідному трубопроводі 600 мА.

4.6. Розмістити приймач КІ-1-П на відстані 10 м від місця під'єднання генератора згідно рис. 4.1.

4.7. Здійснити проходження із приймачем системи КІ-1 в режимі вимірювання струму в стінці підвідного трубопроводу через його вісь перпендикулярно до трубопроводу. Контроль відхилення від маршруту відслідковується за показами портативного комп'ютера системи КІ-1.

4.8. При наявності відхилень від перпендикулярного напрямку при проходженні через вісь трубопроводу процес вимірювання слід повторити.

Додаток Ф.1

(продовж. 3)

4.9. Встановити приймач на віддалі 2 м від попередньої точки початку вимірювань згідно рис. 4.1. та виконати вимірювання згідно п.4.7-4.8.

4.10. Повторити виконання п.4.9 для дослідження всієї ділянки підвідного трубопроводу (25 м).

4.11. Визначені із профілів напруженостей значення сили струмів в стінці контрольованого підвідного трубопроводу занести в протокол випробувань та визначити затухання цих струмів вздовж траси трубопроводу згідно залежності:

$$\alpha = \frac{2000}{\Delta l} \left| \lg \left(\frac{I_{n+1}}{I_n} \right) \right|, \quad (4.1)$$

де I_n, I_{n+1} - виміряна сила струму в двох сусідніх точках підвідного трубопроводу,

Δl - відстань між цими точками.

5. ОФОРМЛЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИПРОБУВАНЬ

5.1. Всі результати випробувань повинні бути представлені в протоколі випробувань.

5.2. На основі протоколу випробувань оформляється акт промислових випробувань.

Виконавець



Б. В. Костів

Додаток Ф.2

Протокол проведення промислових випробувань системи КІ-1 в УМГ
«Прикарпаттрансгаз»



ПРОТОКОЛ

проведення промислових випробувань системи безконтактного визначення струмів в стінці підвідного газопроводу КС "Богородчани" системою КІ-1

1. Випробування проводилося 4.12.2009р. згідно з методикою промислових випробувань «Технологія безконтактного визначення струму в стінці підземного трубопроводу для оцінки його ізоляційного покриття» на підвідному газопроводі діаметром 1420 мм компресорної станції "Богородчани".

2. Визначення струму вздовж контрольованого підвідного трубопроводу

Частота контролю – 868 Гц;

Струм в місці підключення до трубопроводу – 600 мА;

Таблиця 2.1.

Результати визначення струмів системою КІ-1 в стінці підвідного газопроводу компресорної станції "Богородчани" з використанням штучних нейронних мереж

Номер вимірювання	1	2	3	4	5	6	7
I, A	0,5629	0,5281	0,4971	0,4826	0,4554	0,4418	0,4375
$l, м$	0	2	4	6	8	10	12
Номер вимірювання	8	9	10	11	12	13	14
I, A	0,3614	0,4258	0,3586	0,4065	0,3804	0,3697	0,3565
$l, м$	14	16	18	20	22	24	26

Додаток Ф.2

(продовж. 1)

Таблиця 2.2.

Зникання струму вздовж підвідного газопроводу компресорної станції
"Богородчани " з використанням штучних нейронних мереж

l , м	2	4	6	8	10	12	14
α , мБ/м	4,155	3,937	1,930	3,778	1,977	0,631	12,44
l , м	16	18	20	22	24	26	
α , мБ/м	-10,674	11,186	-8,171	4,332	1,845	2,376	

За результатами проведених промислових випробувань було встановлено, що ізоляція трубопроводу діаметром 1420мм, за винятком проміжку 14-20 м, добра. Аналізуючи зникання струму, можна сказати, що зміна зникання струмі на ділянці 14–20 м виникла за рахунок екранування сигналу від трубопроводу. В цьому місці знаходилися бетонні плити, в яких могла бути металева арматура.

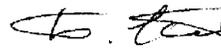
Провівши додатково обчислення затухання в цьому діапазоні за значеннями сили струму до і після бетонних плит було встановлено, що стан ізоляційного покриття добрий (затухання складає 1,206 мБ/м).

Інженер служби НК і ТД
УМГ «Прикарпаттрансгаз»



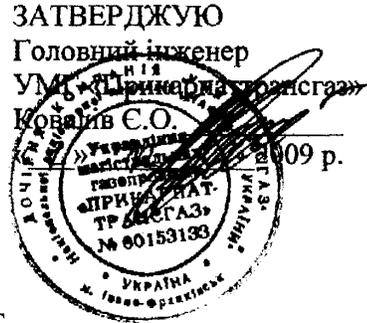
М. Ю. Левицький

Асист. каф МПКЯ і СП ІФНТУНГ



Б.В. Костів

Додаток Ф.3

Акт про виконання промислових випробувань системи КІ-1 в УМГ
«Прикарпаттрансгаз»

про виконання промислових випробувань системи КІ-1

Ми, що нижче підписалися, інженер служби НК і ТД УМГ «Прикарпаттрансгаз» Левицький М. Ю. та асист. каф. МПКЯ і СП ІФНТУНГ Костів Б. В. склали даний акт про те, що були проведені промислові випробування системи КІ-1 на підвідному газопроводі діаметром 1420 мм компресорної станції "Богородчани".

За результатами випробувань було встановлено, що пошкодження ізоляційного покриття підземного газопроводу відсутні.

Додаток: Протокол проведення промислових випробувань системи КІ-1

Інженер служби НК і ТД
УМГ «Прикарпаттрансгаз»

М. Ю. Левицький

Асист. каф МПКЯ і СП ІФНТУНГ

Б.В. Костів

Додаток Х.1

Методика промислових випробувань системи КІ-1 в НГВУ
«Надвірна нафтогаз»



БЕЗКОНТАКТНЕ ВИЗНАЧЕННЯ СТРУМУ В СТИНЦІ ПІДЗЕМНОГО
ТРУБОПРОВОДУ З МЕТОЮ ОЦІНКИ ЙОГО ІЗОЛЯЦІЙНОГО ПОКРИТТЯ

Методика промислових випробувань

ПОГОДЖЕНО

Інженер ЕХЗ

НГВУ «Надвірна нафтогаз»

Дубішак В.М.

« 5 » 12 2009 р.

Додаток Х.1 (продовж. 1)

Методика промислових випробувань призначена для проведення випробувань методики з використанням умовно-нормальних рівнянь для визначення струму при безконтактному контролі ізоляційного покриття з використанням системи КІ-1. Методика розроблена на кафедрі "Методи та прилади контролю якості" Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

1. Мета промислових випробувань

Мета промислових випробувань полягає у перевірці роботи методики визначення струму з використанням умовно-нормальних рівнянь при безконтактному контролі ізоляційного покриття з використанням системи КІ-1.

2. Технічний засіб для визначення інформативних параметрів в процесі безконтактного визначення струмів в стінках підземних трубопроводів

2.1. В якості технічного засобу для контролю ізоляційного покриття підземного трубопроводу використовується система КІ-1.

3. Місце проведення випробувань

3.1. Підземний нафтопровід діаметром 530 мм НГВУ «Надвірнанафтогаз».

4. Методика проведення промислових випробувань.

4.1. Виконання промислових випробувань відбувається згідно схеми приведеної на рис. 4.1.

Додаток Х.1
(продовж. 2)

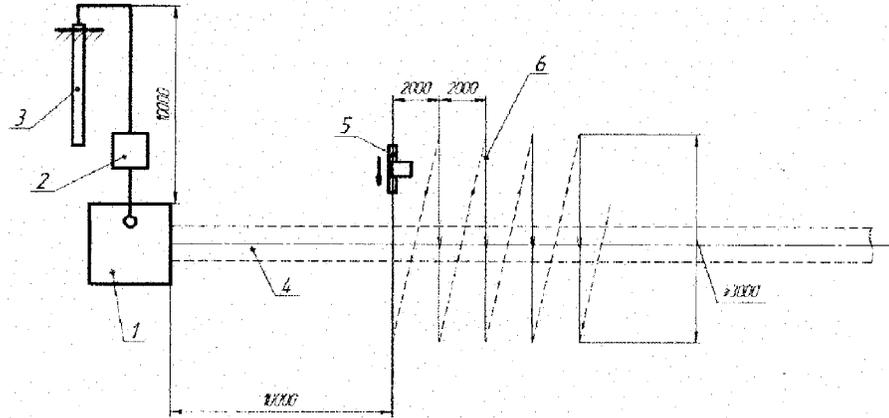


Рис. 4.1. Схema проведення промислових випробувань: 1-крановий вузол; 2-генератор КІ-1-Г; 3-виносне заземлення; 4- підземний нафтопровід; 5-приймач КІ-1-П; 6-маршрут руху оператора

4.2. Ввімкнути та прогріти генератор КІ-1-Г та приймач КІ-1-П протягом 15 хв.

4.3. Встановити робочу частоту генератора 868 Гц.

4.4. Встановити виносне заземлення та під'єднати генератор до заземлення та кранового вузла таким чином, щоб з'єднувальні провідники були перпендикулярні до осі нафтопроводу.

4.5. Шляхом узгодження генератора із нафтопроводом встановити струм 400 мА.

4.6. Розмістити приймач КІ-1-П на відстані 10 м від місця під'єднання генератора згідно рис. 4.1.

4.7. Пройти із приймачем системи КІ-1 в режимі безконтактного вимірювання струму в стінці підземного нафтопроводу з використанням умовно-нормальних рівнянь через вісь нафтопроводу перпендикулярно до осі. Контроль відхилення від перпендикулярного маршруту відслідковувати за показами портативного комп'ютера.

Додаток Х.1
(продовж. 3)

4.8. При наявності відхилень від заданого напрямку при проходженні через вісь нафтопроводу процес вимірювання необхідно повторити.

4.9. Встановити приймач на віддалі 2 м від точки початку вимірювань згідно рис. 4.1. та виконати вимірювання згідно п.4.7-4.8.

4.10. Повторити виконання п.4.9 для дослідження всієї ділянки нафтопроводу (70 м).

4.11. Визначені із профілів напруженостей значення струмів в стінці підземного нафтопроводу занести в протокол випробувань та визначити затухання цих струмів згідно залежності:

$$\alpha = \frac{2000}{\Delta l} \left| \lg \left(\frac{I_{n+1}}{I_n} \right) \right|, \quad (4.1)$$

де I_n, I_{n+1} - виміряна сила струму в двох сусідніх точках підземного нафтопроводу,

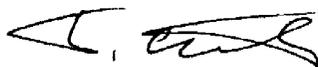
Δl - відстань між цими точками.

5. ОФОРМЛЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИПРОБУВАНЬ

5.1. Всі результати випробувань повинні бути оформлені і представлені в протоколі випробувань.

5.2. На основі протоколу випробувань необхідно оформити акт промислових випробувань.

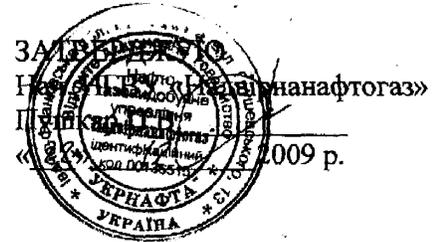
Виконавець



Б. В. Костів

Додаток Х.2

Протокол виконання промислових випробувань системи КІ-1 в НГВУ
«Надвірнанафтогаз»



ПРОТОКОЛ

проведення промислових випробувань системи КІ-1 при безконтактному
визначенні струмів в стінці підземного нафтопроводу в НГВУ
"Надвірнанафтогаз"

1. Випробування проводилося 10.12.2009р. згідно з методикою промислових випробувань «Безконтактне визначення струму в стінці підземного трубопроводу з метою оцінки його ізоляційного покриття» на підземному нафтопроводі діаметром 530 мм в НГВУ «Надвірнанафтогаз».

2. Визначення струму вздовж контрольованого нафтопроводу

Частота контролю – 868 Гц;

Струм в місці підключення до трубопроводу – 400 мА;

Таблиця 2.1.

Результати визначення струмів в стінці підземного нафтопроводу системою КІ-1 з використанням методики умовно-нормальних рівнянь

Номер вимірювання	1	2	3	4	5	6	7
I, A	0,3680	0,3497	0,3313	0,3180	0,2996	0,2827	0,2736
$l, м$	0	2	4	6	8	10	12
Номер вимірювання	8	9	10	11	12	13	14
I, A	0,2509	0,2375	0,2275	0,2258	0,2255	0,2239	0,2228
$l, м$	14	16	18	20	22	24	26
Номер вимірювання	15	16	17	18	19	20	21
I, A	0,2202	0,2198	0,2196	0,2194	0,2163	0,2129	0,2118
$l, м$	28	30	32	34	36	38	40

Додаток Х.2
(продовж. 1)

Продовження табл. 2.1.

Номер вимірювання	22	23	24	25	26	27	28
I, A	0,2108	0,2097	0,2068	0,2026	0,2003	0,1988	0,2108
$l, м$	42	44	46	48	50	52	54
Номер вимірювання	29	30	31	32	33	34	35
I, A	0,1952	0,1944	0,1943	0,1911	0,1906	0,1869	0,1851
$l, м$	56	58	60	62	64	66	68
Номер вимірювання	36						
I, A	0,1829						
$l, м$	70						

Таблиця 2.2.

Зникання струму вздовж трубопроводу

$l, м$	2	4	6	8	10	12	14
$\alpha, мБ/м$	2,222	2,340	1,782	2,594	2,510	1,430	3,749
$l, м$	16	18	20	22	24	26	28
$\alpha, мБ/м$	2,387	1,867	0,331	0,044	0,309	0,218	0,522
$l, м$	30	32	34	36	38	40	42
$\alpha, мБ/м$	0,074	0,042	0,029	0,622	0,685	0,218	0,215
$l, м$	44	46	48	50	52	54	56
$\alpha, мБ/м$	0,221	0,609	0,894	0,497	0,318	0,798	0,221
$l, м$	58	60	62	64	66	68	70
$\alpha, мБ/м$	0,177	0,017	0,712	0,114	0,850	0,4237	0,533

За результатами проведених промислових випробувань було встановлено, що на ділянці 0-18 м мають місце численні пошкодження ізоляційного покриття. На проміжках 46-48 та 64-66 м якість ізоляційного покриття задовільна. На інших ділянках контрольованого підземного нафтопроводу якість ізоляційного покриття добра.

Інженер ЕХЗ НГВУ "Надвірнанафтогаз"

В. М. Дубішак

Асист. каф МПКЯ і СП ІФНТУНГ

Б.В. Костів

Додаток Х.3

Акт про виконання промислових випробувань системи КІ-1 в НГВУ
«Надвірнанафтогаз»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Нач. НГВУ «Надвірнанафтогаз»
Пушкар І. В.
« 22 »



АКТ

виконання промислових випробувань приладу КІ-1 в НГВУ
«Надвірнанафтогаз» при контролі ізоляційного покриття підземного
нафтопроводу

Ми, що нижче підписалися, інж. ЕХЗ Дубіщак В. М. НГВУ «Надвірнанафтогаз» та асист. каф. МПКЯ і СП ІФНТУНГ Костів Б. В. склали даний акт про те, що були проведені промислові випробування системи КІ-1 на підземному нафтопроводі діаметром 530 мм в НГВУ «Надвірнанафтогаз».

За результатами проведених промислових випробувань було встановлено, що на ділянці 0-18 м контрольованого підземного нафтопроводу від початку його обстеження присутні численні пошкодження ізоляційного покриття. На проміжках 46-48 та 64-66 м якість ізоляційного покриття задовільна. На інших ділянках контрольованого підземного нафтопроводу якість його ізоляційного покриття добра.

Додаток: Протокол проведення промислових випробувань в НГВУ «Надвірнанафтогаз» системи КІ-1.

Інженер ЕХЗ НГВУ "Надвірнанафтогаз"

В. М. Дубіщак

Асист. каф МПКЯ і СП ІФНТУНГ

Б.В. Костів

Додаток Ц

Акт впровадження системи КІ-1 в навчальний процес



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
**ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
 НАФТИ І ГАЗУ**

76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15,
 тел. (380) 03422 4-22-64, 4-24-53, факс. (380) 03422 4-21-39;

АКТ

впровадження розроблених системи для безконтактного визначення струмів в стінках підземних трубопроводів і установки для дослідження її метрологічних характеристик в навчальний процес в ІФНТУНГ

Комісія в складі зав. каф. "Методи та прилади контролю якості і сертифікації продукції" (МПКЯ і СП) проф. Кісіля І.С., проф. каф. МПКЯ і СП Середюка О.Є. і проф. каф. МПКЯ і СП Лютака З.П. констатує, що асист. Костівим Б.В. каф. МПКЯ і СП ІФНТУНГ під час навчання в заочній аспірантурі ІФНТУНГ розроблені система КІ-1 для безконтактного визначення струмів в стінках підземних трубопроводів і установка для дослідження її метрологічних характеристик, які впроваджені в навчальний процес із студентами напряму "Приладобудування" і спеціальності "Прилади та системи неруйнівного контролю" при вивченні дисциплін "Електричні, магнітні та електромагнітні методи контролю" (ЕМК), "Обробка сигналів в інтроскопії" (ОСІ) і "Метрологія та взаємозамінність" (МВ) протягом 6-го і 7-го семестрів їх навчання.

За допомогою системи КІ-1 студенти здійснюють виконання двох лабораторних робіт з дисципліни ЕМК, з дисципліни ОСІ – одного практичного заняття і з дисципліни МВ – двох практичних занять.

Виконання вказаних занять з використанням КІ-1 і установки для дослідження її метрологічних характеристик дає можливість студентам напряму "Приладобудування" і спеціальності "Прилади та системи неруйнівного контролю" практично засвоїти відповідні розділи вказаних дисциплін і відчуті роль відповідних розділів вказаних дисциплін в майбутньому при їх спеціалізації за спеціальністю.



Проректор

Зав. каф. МПКЯ і СП

Проф. каф. МПКЯ і СП

Проф. каф. МПКЯ і СП

[Handwritten signature]

[Handwritten signature]

[Handwritten signature]

[Handwritten signature]

Козак Ф.В.

Кісіль І.С.

Середюк О.Є.

Лютак З.П.