

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Інститут інформаційних технологій

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

Кульчак Максим Богданович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 620.178

(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Контроль зварних швів будівельних конструкцій ультразвуковим методом

(назва роботи)

(назва освітньої програми)

152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

(шифр і назва спеціальності)

Науковий керівник _____ Боднар Роман Тарасович, канд. техн. наук, доцент

(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІВТ

професор _____ *О. Є. Середюк*

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Рецензент

(посада) _____ (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

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

Івано-Франківськ– 2023 рік

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут інформаційних технологій

Кафедра інформаційно-вимірюваних технологій

Освітній рівень магістр _____

Спеціальність 152 метрологія _____

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІВТ _____

О. Є. Середюк

« _____ » _____ 2023 року

ЗАВДАННЯ

НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

_____ Кульчак Максим Богданович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи. Контроль зварних швів будівельних конструкцій ультразвуковим методом

Керівник роботи

Боднар Роман Тарасович, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від "15" _____ грудня _____ 2023 року
№ _____ 734/7

2. Термін подання студентом роботи "12" 01. 2024 року

3. Вихідні дані до роботи: $U_{\text{вих.}}$ – вихідна напруга підсилювача, яка повинна бути не меншою нижньої межі спрацювання схеми порівняння, яка рівна $2V$; $U_{\text{вх.}}$ – величина вхідного сигналу з п'єзоперетворювача, приблизно рівна $0,02$ В. Призма для п'єзоперетворювача із полікарбонату

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Аналіз об'єкту контролю, існуючих методів і приладів контролю будівельних конструкцій. Теоретичне обґрунтування методу контролю. Розробка методики контролю. Розробка конструкції установки. Метрологічний аналіз розробки

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

Теорія методу (А3) ; Структурна схема установки (А3); . Складальне креслення установки (А3); Складальне креслення вузла приладу із деталюванням (А3) Схема електрична структурна (А3) Часова діаграма приладу (А3); Метрологічний аналіз (А3)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Огляд методів і засобів контролю		
2.	Теоретичне обґрунтування методу контролю		
3.	Розробка конструкції установки		
4.	Розробка методики контролю		
5.	Метрологічний аналіз		
6.	Оформлення роботи		

Студент _____ ініціали) Кульчак М. Б. (прізвище та ініціали)
(підпис)

Керівник роботи _____ ініціали) Боднар Р. Т. (прізвище та ініціали)
(підпис)

РЕФЕРАТ

Магістерська робота: 69 с., 11 рис., 1 додаток, 15 джерел, 7 аркушів креслень.

Об'єкт дослідження – зварні шви будівельних конструкцій.

Мета роботи – розробка компактного ультразвукового дефектоскопу для контролю якості зварних швів будівельних конструкцій.

Метод дослідження – математичне моделювання фізичних процесів, які відбуваються при контролі зварних швів будівельних конструкцій, як в п'єзоперетворювачі, так і в самому об'єкті контролю.

В магістерській роботі розроблено компактний ультразвуковий дефектоскоп для контролю зварних швів будівельних конструкцій.

Зроблено огляд і аналіз методів для контролю зварних швів. Встановлено, що найкращим методом буде ультразвуковий. Описані схеми контролю різних зварних швів ультразвуковим дефектоскопом. Зроблено розрахунок необхідних параметрів для контролю. Здійснено розробку функціональної і структурної схем дефектоскопа і проведено метрологічний аналіз.

ДЕФЕКТ, П'ЄЗОПЕРЕТВОРЮВАЧ, ЗВАРНИЙ ШОВ, УЛЬТРАЗВУК,
БУДІВЕЛЬНА КОНСТРУКЦІЯ, ЧАСТОТА КОЛИВАНЬ, ПОХИБКА.

ABSTRACT

Master`s work: 69 p., 11 lines., 1 additions, 15 sources, sheets 7.

A research object is the welded stitches of building constructions.

Purpose of work - to develop compact ultrasonic to the fault detector for the control of internalss of the welded stitches of building constructions.

A research method is the mathematical design of physical processes which take place at the control of the welded stitches of building constructions, both in transformers and in the object of control.

In this diploma project a compact ultrasonic fault detector is developed for the control of the welded stitches of building constructions.

A review and analysis of methods is done for the control of the welded stitches. It is set that it will be the best method ultrasonic. Described charts of control of the different welded stitches by an ultrasonic fault detector. The calculation of necessary parameters is done for the control. Development of flow diagrams of fault detector functional and is carried out and conducted the metrology analysis.

DEFECT, TRANSFORMER, WELDED STITCH, ULTRASOUND,
BUILDING CONSTRUCTION, FREQUENCY OF VIBRATIONS, ERROR.

Зміст

	Стор.
Вступ.....	5
1 Аналіз методів і постановка задачі на магістерську роботу.....	8
1.1 Контроль якості зварних з'єднань радіографічним методом.....	
1.2 Магнітографічний контроль якості зварних з'єднань.....	
1.3 Ультразвуковий метод контролю якості зварних з'єднань.....	
1.4 Візуально-оптичний метод контролю.....	
1.5 Радіохвильовий метод контролю зварних швів.....	
1.6 Вибір методу для контролю зварних швів і постановка задачі на магістерську роботу.....	
2 Розробка приладу для ультразвукового контролю та методики контролю.....	
2.1 Теоретичне обґрунтування ультразвукового методу контролю будівельних конструкцій.....	
2.1.1 Вибір частоти ультразвукових коливань.....	
2.1.2 Ультразвукова дефектоскопія стикових зварних з'єднань.....	
2.1.3 Ультразвукова дефектоскопія кутових зварних з'єднань.....	
2.1.4 Контроль зварних швів внаклад.....	
2.2 Розробка компонентів приладу для ультразвукового контролю зварних швів будівельних конструкцій.....	
2.2.1 Розробка функціональної схеми ультразвукового компактного дефектоскопу для контролю зварних швів будівельних конструкцій.....	
2.2.2 Розробка електричної принципової схеми ультразвукового компактного дефектоскопу.....	
2.2.2.1 Розрахунок підсилювача відбитих сигналів.....	

2.2.3 Розробка конструкції проектного приладу.....	
2.2.3.1 Розрахунок похилого перетворювача.....	
2.3 Розробка методики проведення контролю за допомогою спроєктованого приладу.....	
3 Метрологічний аналіз пристрою для ультразвукового контролю зварних швів.....	
3.1 Огляд метрологічних характеристик контролю.....	
3.2 Аналіз похибок при ультразвуковому контролі зварних швів.....	
3.3 Розробка методики стандартизації параметрів розроблюваного приладу.....	
Висновки.....	
Перелік посилань на джерела.....	
Додатки	

ВСТУП

Приблизно половина всього використовуваного в будівельній індустрії прокату витрачається на виготовлення залізобетонних конструкцій, вживаних при споруджуванні будівель промислового і цивільного призначення. Основними зварними елементами таких конструкцій є заставні деталі і стики арматури. У загальному випадку заставна деталь є плоскою пластиною, до якої втавр або внаклад приварений стрижень періодичного профілю. Найчастіше застосовують таврові з'єднання заставних деталей, виконані зварюванням під флюсом. Пластини виготовляють із сталей марок Ст3 або Ст5 завтовшки 6... 30 мм, а матеріалом стрижнів служить сталь марки 35ГС або Ст5. Число стрижнів в одній заставній деталі може бути від 2 до 12 з діаметром 8... 40 мм.

Одним з найбільш відповідальних елементів при виготовленні залізобетонних конструкцій є зварні стикові з'єднання стрижнів арматури періодичного профілю діаметром 20 ... 70 мм, що виготовляються із сталей марок 35ГС або Ст5. Звичайно для виконання таких з'єднань застосовують ванне зварювання в інвентарних формах, ванно-шовне зварювання на сталевій скобі, що залишається, і інші. Як і заставні деталі, стики арматури при роботі зазнають в основному статичних навантажень. До недавнього часу єдиним методом контролю цих з'єднань був вибірковий руйнуючий контроль.

При зварці плавленням в зварних швах можуть утворюватися дефекти різного виду. За правилами контролю і технічними умовами на прийом готової продукції оцінку якості зварного з'єднання проводять по зовнішньому огляду і за результатами фізичних методів контролю. Зовнішнім оглядом визначають зовнішні дефекти, а фізичними методами контролю – внутрішні і невидимі поверхневі і підповерхневі дефекти. Дефекти, що з цієї точки зору утворюються при зварці, доцільно розділити на зовнішні і внутрішні.

Статистичним аналізом результатів радіографічного контролю і

фрактографічного аналізу великого числа проконтрольованих з'єднань встановлено, що основними внутрішніми дефектами обстежених зварних з'єднань є пори, шлакові включення, непровари і несплави. Тріщини були зафіксовані тільки в зварних з'єднаннях аустенітних сталей і в дуже незначній кількості ($\sim 0,2\%$).

Шви зварних з'єднань довгий час в основному контролювали зовнішнім оглядом, вимірюванням і шляхом нагляду за дотриманням встановленої технології в процесі виготовлення конструкції. Надійніші методи контролю, що визначають наявність або відсутність внутрішніх дефектів в швах без руйнування конструкції, в промисловості майже не застосовували.

Разом з тим в кутових швах можуть бути внутрішні дефекти, які неможливо виявити зовнішнім оглядом у вигляді пор, шлакових включень, непроварів і тріщин, які в деяких випадках знижують міцність з'єднань, особливо при дії вібраційних навантажень.

При виготовленні або монтажі будівельних конструкцій застосовують стикові, кутові (таврові) і накладні з'єднання. На жаль, не всі зварні шви доступні для проведення неруйнівного контролю. Такі з'єднання прийнято називати недефектоскопічними (не придатні для контролю).

Дефектоскопічність в загальному випадку є сукупністю властивостей контролюваного виробу, що визначають можливість проведення достовірного неруйнівного контролю. На дефектоскопічність конструкції впливає багато факторів, головні з яких: товщина і кривизна виробу, який контролюється, наявність доступу, спосіб зварювання, структура матеріалу, наявність неправдивих відбивачів.

Об'єктом дослідження є процес поширення ультразвукових хвиль в об'єкті контролю ультразвукових хвиль та взаємодії ультразвукових хвиль із об'єктом контролю.

Предметом дослідження є способи контролю якості досліджуваних зварних з'єднань будівельних конструкцій.

Наукова новизна магістерської роботи полягає у теоретичному обґрунтуванні взаємодії ультразвукових хвиль із об'єктом контролю з метою оцінки якості досліджуваних зварних з'єднань будівельних конструкцій.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблена пристрій є компактним, досить дешевим, дає досить швидкий і якісний контроль зварних з'єднань будівельних конструкцій

1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ

1.1 Контроль якості зварних з'єднань радіографічним методом

В радіаційній дефектоскопії зварних з'єднань застосовують радіаційні ізографи, які випромінюють γ -кванти. Значно ширше застосування мають рентгенівські апарати, випромінювання яких за властивостями близьке до γ -випромінювання.

При просвічуванні іонізуючим випромінюванням зварного з'єднання отримують тіньове зображення об'єкта на чутливій плівці (рис. 1.1). Такий метод називається радіографічним.

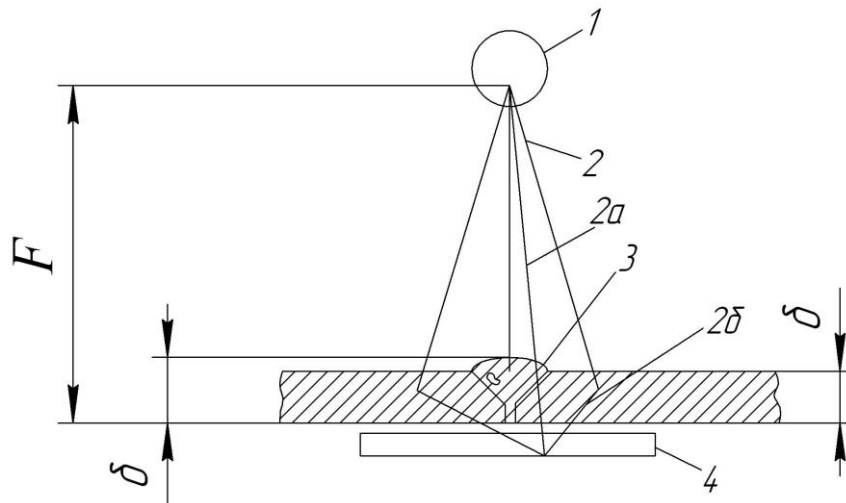


Рисунок 1.1 – Схема проведення рентгенівського контролю

Густина матеріалу і його товщина впливають на інтенсивність випромінювання, яке проходить через об'єкт контролю. За результатами вимірювання випромінювання за об'єктом визначають наявність дефектів в об'єкті контролю, що приведе до зміни потоку випромінювання після об'єкта контролю.

За допомогою фоточувливих детекторів (радіографічні плівки,

напівпровідникові пластини) здійснюється виявлення і реєстрація розподілу інтенсивності пройденого випромінювання.

Найважливішою характеристикою радіографічних плівок є оптична густина почорніння, яку виражають десятковим логарифмом відношення падаючого на плівку світлового потоку до пройшовшого. Величина, обернена до дози в рентгенах, яка потрібна для отримання певної оптичної густини почорніння, називається чутливістю рентгенівської плівки. Здатність плівки перетворювати дозу D_v випромінювання в оптичну густина почорніння характеризується градієнтом плівок:

$$g = \frac{dD}{d \lg D_s}. \quad (1.1)$$

Градієнт g називають коефіцієнтом контрастності рентгенівської плівки [1].

Радіографічні плівки бувають грубозернисті і дрібнозернисті. Останні використовують для контролю виробів, що допускають тільки малі дефекти.

При застосуванні радіографічної дефектоскопії недостатньо точно визначаються розміри дефектів та глибина їх розміщення в напрямку просвічування. Апаратура радіографічного контролю є досить громіздкою. Суттєвим недоліком є шкідливий вплив іонізуючого випромінювання на організм дефектоскопіста.

1.2 Магнітографічний контроль якості зварних з'єднань

Для даного контролю зварне з'єднання треба піддавати намагнічуванню з магнітною стрічкою. Перетворення інформації в електричний сигнал здійснюється по остаточній намагніченості плівки. Реєстрація полів розсіяння дефектів проводиться в прикладеному магнітному полі. Цим методом з найбільшою чутливістю виявляються тріщини, непровари, скупчення пор та інших дефектів, які орієнтовані перпендикулярно до напрямку магнітного потоку. Як і при радіаційному контролі, часто під чутливістю методу розуміють відношення вертикального розміру мінімального дефекту, який

виявляється до товщини металу:

$$\gamma = \frac{\Delta a_1}{\delta} \cdot 100\%, \quad (1.2)$$

де Δa_1 – вертикальний розмір мінімального дефекту; δ – товщина металу.

При цьому чутливість залежить від глибини залягання дефекту. Чим глибше залягає дефект, тим при інших однакових умовах повинна бути більша величина Δa_1 , а отже, менша чутливість.

Процес магнітографічного контролю можна розділити на три операції: 1) запис полів дефектів на магнітоносій; 2) відтворення магнітного запису; 3) оцінка дефектності зварного з'єднання яке досліджується по сигналах, які спостерігаються на екрані пристрою відтворення. Продуктивність даного методу неруйнівного контролю без засобів автоматизації складає не менше 0,3 м/хв.

При розробці систем класифікації дефектів, які виявляються магнітографічною дефектоскопією, необхідно враховувати методи калібровки і еталонування, які використовують на окремих операціях процесу дефектоскопії. При умові підтримки процесу контролю в оптимальних режимах магнітографічний спосіб дозволяє приблизно оцінити глибину залягання і характер даного дефекту.

Сучасні засоби магнітографічної дефектоскопії, які обладнані пристроями калібровки, дозволяють виміряти параметри дефектів, величина яких не менше 3-5 % від товщини стінки досліджуваного зварного з'єднання.

Хороші результати можна отримати при магнітографії, якщо висота підсилення зварних швів не перевищує 25% δ і мають плавні переходи шва до основного металу, шорсткість шва не перевищує 20% від висоти валика підсилення. Магнітографія застосовується при контролі зварних з'єднань товщиною до 20 мм. При знятому валику підсилення чутливість методу досягає 3-4 %, без знятого підсилення чутливість складає 8-15 %. Якість інформації, яка отримується у великій мірі залежить від того як плівка прилягає до

поверхні шва. Прижим повинен бути щільним і рівномірним.

Основним і дуже важливим недоліком даного методу є те, що ним можна контролювати тільки поверхневі дефекти. Ще одним із недоліків є те, що для того, щоб виявити дефект потрібно плівку прикладати до ділянки, яка контролюється, а у важкодоступних місцях це не завжди можливо.

1.3 Ультразвуковий метод контролю якості зварних з'єднань

У теперішній час значного поширення набув ультразвуковий метод контролю якості зварних з'єднань. Цей вид неруйнівного контролю базується на взаємодії акустичних хвиль із середовищем, яка приводить до відбивання, розсіювання та поглинання коливань у середовищі. При ультразвуковому контролі використовують три основних методи, які відрізняються один від одного за ознакою виявлення дефекту: тіньовий метод, луно-метод, дзеркально-тіньовий метод [2].

Насамперед — імпульсний луно-метод, побудований на відбитті УЗ-коливань від несучільності (відбивача), причому амплітуда відбитого-сигналу пропорційна площі цього відбивача. Цим методом контролюють поковки, штампування, прокат, термооброблене лиття, пластмаси, вимірюють товщину металів і оцінюють структуру матеріалів. Луно-метод широко використовують для контролю зварних з'єднань. Чутливість луно-методу висока: вона досягає $0,5 \text{ мм}^2$ на глибині 100 мм. До переваг даного методу варто також віднести можливість однобічного доступу до зони шва, оскільки досить тільки одного перетворювача і для випромінювання і для прийому УЗ-сигналів. Недолік луно-методу — це різка зміна амплітуди відбитого сигналу від орієнтації дефекту (кута в між УЗ-променем і площиною відбивача).

Тіньовий метод інколи називають методом наскрізного прозвучування. Випромінювач і приймач розділені. Дефект на шляху ультразвукових хвиль ослаблює сигнал, який приймається.

Тіньовий і дзеркально-тіньовий методи, широко розповсюджені,

засновані на зменшенні амплітуди ультразвукових коливань унаслідок наявності несучільності. Чим більший дефект, тим слабкіший сигнал, який прийшов до приймача. У тіньовому методі ультразвуковий промінь йде прямо від генератора до приймача через контрольований метал. Тіньовий метод застосовують в основному для контролю прокату малої і середньої товщини, деяких гумових виробів (покришок коліс), для дослідження пружних властивостей склопластиків, бетону, графіту і т.д. На відміну від луно-методу тіньовий метод має високу завадостійкість і слабку залежність амплітуди від кута в орієнтації дефекту. Однак має серйозні недоліки: необхідність двостороннього доступу і мала точність оцінки координат дефектів.

Дзеркально-тіньовий метод відрізняється від тіньового тим, що реєструє зменшення УЗК, відбитих від нижньої поверхні листа.

Дзеркально-тіньовий метод, як видно зі схеми, не вимагає двостороннього доступу до з'єднання. Цей метод широко використовують для контролю залізничних рейок. Він дозволяє також більш вірогідно визначати наявність корневих дефектів у стикових швах.

Недоліком ультразвукового методу є те, що для того, щоб отримати хороший контакт, об'єкт контролю треба змащувати контактною рідиною, а також неточність визначення поперечних розмірів дефектів. Перевагами даного методу є те, що самі дефектоскопи є компактними і легкими, мають досить високу роздільну здатність і точність контролю у напрямі проходження ультразвукового проміня, не мають шкідливого впливу на оператора.

1.4 Візуально-оптичний метод контролю

Візуальний контроль (огляд неозброєним оком) – найпростіший і загальнодоступний вид неруйнівного контролю, що забезпечує високу продуктивність контролю оптичними методами.

Головною особливістю його є активна роль оператора в його проведенні і отриманні достовірних результатів. Візуальний контроль проводиться без

спеціальних засобів, що підсилюють природні якості людини-оператора. Він особливо ефективний при контролі об'єктів порівняно великих розмірів при необхідності виявлення грубих дефектів, відхилень форми, розмірів і оптичних характеристик..

Мінімальні розміри помітних деталей зображення конкретних контрольованих об'єктів (дефектів) визначаються гостротою зору оператора і залежать також від умов контролю. При тривалій роботі очі оператора стомлюються і гострота зору знижується, що вимагає обмеження часу безперервної роботи оператора, щоб уникнути помилок і пропусків дефектів. Гострота зору сильно знижується також із зменшенням яскравості освітлення контрольованого об'єкту.

При візуальному контролі оператор з нормальним зором на відстані якнайкращого зору впевнено виявляє дефекти з мінімальним розміром 0,1 мм в площині, яка є перпендикулярною до лінії спостереження.

Дуже серйозним недоліком цього методу є те, що можна виявляти тільки поверхневі дефекти.

Візуально-оптичним називають неруйнівний контроль якості із застосуванням оптичних засобів, що дозволяють істотно розширити межі природних можливостей органів зору людини. Він є технічним продовженням візуального контролю, дає можливість виявляти дрібніші дефекти і проводити вимірювання з високою роздільною здатністю (1-5 мкм). При проведенні візуально-оптичного контролю треба враховувати основні особливості, характерні для візуального контролю, оскільки в обох випадках вирішальну роль грає оператор. Підсилити можливості людини дозволяють лупи, мікроскопи, телескопічні пристрої і інші технічні засоби. Головним недоліком візуально-оптичного контролю є зниження продуктивності проведення неруйнівного контролю. Тому звичайно проводять багатоступінчастий контроль: оглядають поверхню виробу без оптичних засобів, виявляючи крупні дефекти і підозрілі місця, вивчають ці місця через лупу (однolінзовий

мікроскоп), а потім досліджують окремі ділянки контрольованого виробу за допомогою багатолінзового мікроскопа, послідовно підвищуючи кратність його збільшення.

Лупи призначені для оптичного контролю близько розташованих елементів зображення при невеликому збільшенні (2-20x) і звичайно при ручному контролі. Зручність роботи з ними визначається тим, що їх легко переміщати по контрольованому об'єкту, а зона огляду лупи порівняно велика.

Мікроскоп є оптичний багатолінзовий пристрій для спостереження елементів, не видимих неозброєним оком, що має регулювання оптичних властивостей. Він дає можливість одержати якісне збільшене зображення, причому збільшення може досягати 1000 разів, а лінійна роздільна здатність— 0,5 мкм. Для цілей неруйнівного контролю якості досить широко застосовують мікроскопи серійні (універсальні, вимірювальні, металографічні та ін.) і спеціалізовані для вирішення конкретних контрольовано-вимірювальних завдань.

Візуально-оптичний контроль виявляє у непрозорих об'єктах тільки поверхневі дефекти.

1.5 Радіохвильовий метод контролю зварних швів

При рішенні задач дефектоскопії із застосуванням НВЧ, як правило, використовують одні і ті ж методи, схеми пристроїв і приладів. Вибір методів і засобів багато в чому визначається фізичними властивостями середовищ (матеріалів) і дефектів. З числа фізичних властивостей матеріалів головними є діелектричні. Взаємодія хвиль НВЧ з середовищем, визначення потужності випромінювання і чутливості приймального пристрою, точність вимірювань і роздільна здатність, оцінка результатів експерименту і їх оптимізація вимагають знання електричних параметрів середовищ — діелектричної проникності і тангенса кута діелектричних втрат.

Оскільки, нам потрібно контролювати зварні шви, тобто матеріал не діелектричний, то даний метод нам не підходить.

1.6 Вибір методу для контролю зварних швів і постановка задачі на магістерську роботу

Для того, щоб проводити дефектоскопію зварних з'єднань будівельних конструкцій нам потрібен такий метод контролю, який давав би досить високу роздільну здатність і точність при виявленні різного роду дефектів. Також досить важливим є те, щоб сам дефектоскоп мав малі габаритні розміри і масу для того, щоб ним можна було проводити контроль у важкодоступних місцях. Важливо щоб контроль і розшифрування результатів міг проводити один оператор і за короткий час.

Виходячи з вищесказаного всім цим вимогам відповідає ультразвукова апаратура, в якій використовується луно-метод.

Отже, завдання на дану магістерську роботу наступне:

- теоретично обґрунтувати ультразвуковий метод контролю зварних швів будівельних конструкцій;
- розробити функціональну схему ультразвукового приладу для контролю зварних швів будівельних конструкцій;
- розробити електричну принципову схему ультразвукового приладу для контролю зварних швів будівельних конструкцій;
- розробити конструкцію приладу;
- розробити методику проведення контролю за допомогою спроектованого приладу;
- зробити метрологічний аналіз для спроектованого приладу;

2 РОЗРОБКА ПРИЛАДУ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЮ ТА МЕТОДИКИ КОНТРОЛЮ

2.1 Теоретичне обґрунтування ультразвукового методу контролю будівельних конструкцій

2.1.1 Вибір частоти ультразвукових коливань

Правильний вибір частоти забезпечує необхідну чутливість ультразвукового контролю. Чим вища частота тим менша довжина ультразвукових коливань в контрольованому виробі і тим кращі умови віддзеркалення їх від дефектів. Підвищення частоти прозвучування збільшує направленість випромінювання і прийому. При цьому зростає відношення відбитої від дефекту енергії до загальної енергії, що вводиться у виріб, що також сприяє підвищенню чутливості контролю. Проте із збільшенням частоти підвищується коефіцієнт загасання ультразвукових коливань в металі, погіршуються умови їх проходження через поверхню вводу, збільшується інтенсивність віддзеркалень від меж зерен і неоднорідностей металу, що не є дефектами.

Частота коливань при контролі визначається в основному коефіцієнтом загасання, рівнем структурної реверберації металу і габаритами контрольованого виробу. Знаючи ці характеристики, можна оцінити і вибрати оптимальну частоту, яка забезпечить найбільшу чутливість контролю при мінімальних втратах енергії на розсіювання і поглинання її зернами металу.

В ультразвуковому діапазоні поглинання звуку в металі, обумовлено втратами на гістерезис і теплопровідність. У полікристалічних металах (наприклад, чавуни і сталі) загасання визначається поглинанням і розсіянням ультразвуку на межах зерен і структурних складових і істотно залежить від співвідношення середньої величини розміру зерна в поперечнику D і довжини

пружної хвилі λ . При $\lambda \ll D$ пружні хвилі поглинаються в кожному зерні, і загасання визначається в основному поглинанням [4].

При $\lambda \approx D$ загасання різко зростає за рахунок дифузного розсіяння пружних хвиль, які проникають (дифундує) між окремими кристалами металу. Особливо велике загасання при $\lambda \approx (3 - 4) D$, оскільки до дифузного розсіяння додається поглинання, пов'язане з релаксацією (зменшенням) теплопровідності на анізотропних кристалах.

При $\lambda \gg D$ відбувається розсіяння хвиль дрібними кристалами металу, коефіцієнт загасання пропорційний f^4 .

Для дефектоскопії звичайно застосовують частоти 0,5 – 10 МГц (при цьому $\lambda > (10 - 15) D$). У цьому інтервалі пружні хвилі затухають слабо, і рідко спостерігаються перешкоди від структурних складових.

Отже, ми маємо швидкість поширення поздовжніх ультразвукових коливань в об'єкті контролю $c \approx 6000$ м/с. Визначимо довжину пружної хвилі λ для частот 1,25; 2,5 і 5 МГц.

$$\lambda = \frac{f}{c}. \quad (2.1)$$

Для $f = 1,25$ МГц, $\lambda = 6 \cdot 10^6 / 1,25 \cdot 10^6 = 4,8$ мм.

Для $f = 2,5$ МГц, $\lambda = 6 \cdot 10^6 / 2,5 \cdot 10^6 = 2,4$ мм.

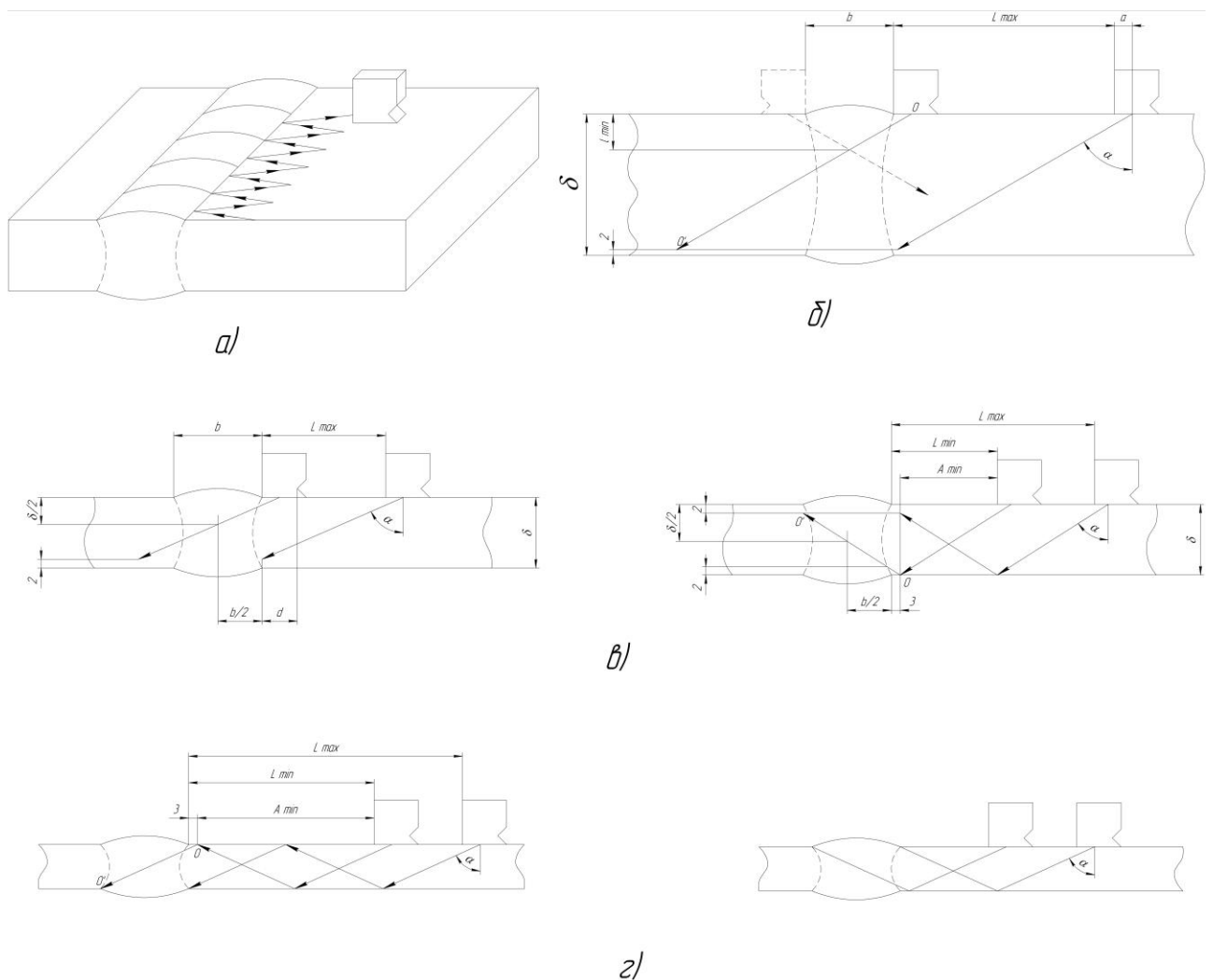
Для $f = 5$ МГц, $\lambda = 6 \cdot 10^6 / 5 \cdot 10^6 = 1,2$ мм.

З даних розрахунків можна зробити висновок, що найоптимальнішою частотою для нас є 5 МГц. Тому, що при менших частотах довжина хвилі досить велика і буде огинати дефекти, які менші ніж 2,4 мм, особливо це стосується тріщин.

2.1.2 Ультразвукова дефектоскопія стикових зварних з'єднань

Контроль стикових зварних з'єднань, як правило здійснюють методом віддзеркалень по однощуповій схемі. Значно рідше застосовують метод контролю двома пошуковими головками.

Вводити ультразвукові коливання за допомогою прямих випромінювачів безпосередньо в наплавлений метал не можна, оскільки між грубою неплюскою поверхнею «підсилення» і щупом не вдається створити задовільний акустичний контакт. Тому прозвучування швів ведуть за допомогою призматичних випромінювачів, які зигзагоподібно переміщуються в певних межах уздовж шва (рис. 2.1, а); крок поздовжнього переміщення складає 2-5 мм.



а – крок повздовжнього переміщення випромінювача; б – при прозвучуванні прямим променем; в – при прозвучуванні одноразово відбитим променем; г – при прозвучуванні багаторазово відбитим променем

Рисунок 2.1 – Схеми прозвучування стикових зварних швів

Для виявлення дефектів, різним чином орієнтованих в металі, шов слід прозвучувати з двох боків «підсилення». При цьому виключається також пропуск поряд розташованих дефектів, який може бути викликаний інтерференцією відбитих від них коливань.

Шви завтовшки більше 150 мм прозвучують прямим променем з двох протилежних поверхонь металу (при можливості доступу до обох поверхонь).

Проконтролювати, весь об'єм наплавленого металу з однієї поверхні не вдається, оскільки для прозвучування таких швів одноразово відбитим променем чутливість дефектоскопа виявляється недостатньою.

При прозвучуванні шва з однієї поверхні прямим променем (рис. 2.1, б) залишається непроконтрольована „мертва зона”, висота l_{\min} яка зв'язана з шириною «підсилення» b співвідношенням:

$$l_{\min} = \left(\frac{b}{2} + d \right) \cdot \operatorname{ctg} \alpha, \quad (2.2)$$

де b – ширина «підсилення»; d – відстань центру випромінювання щупа від його передньої грані; α – кут введення променя.

Підставимо приблизні значення у вищенаведену формулу

$$l_{\min} = \left(\frac{10}{2} + 6 \right) \cdot \operatorname{ctg} 67^\circ = 5 \text{ мм.}$$

Важливою характеристикою чутливості ультразвукового контролю є розмір мертвої зони [5].

Наявність мертвої зони – це, мабуть, основний недолік луно-методу, який в деяких випадках обмежує його застосування, знижує надійність і ефективність контролю.

Величина „мертвої зони” при контролі шва може бути легко визначена за шкалою глибиноміра в дефектоскопах типу УЗД-НИИМ-5 або по координатній лінійці. Значення „мертвої зони” визначається цифрою за шкалою «Н» для даного типу випромінювача, яка розташована проти значення $b/2$ на відповідній шкалі «L».

Для забезпечення більшої чутливості і зменшення «мертвої» зони кожен шов контролюють щупами з різними кутами введення променя. Типи випромінювачів і їх кількість вибирають дослідним шляхом.

Шви завтовшки 25-150 мм можуть бути прозвучені з однієї поверхні основного металу прямим і одноразово відбитим променем (рис. 2.1, в). При цьому кут введення α вибирають таким, щоб вісь променя в одному з положень випромінювача перетнула вісь симетрії шва завтовшки δ на глибині $0,5\delta$. Величина кута α визначається рівнянням

$$\operatorname{tg}\alpha \geq \frac{b}{\delta} + \frac{2d}{\delta} \quad (2.3)$$

при прозвучуванні прямим променем і

$$\operatorname{tg}\alpha \geq \frac{b}{\delta} \quad (2.4)$$

при прозвучуванні одноразово відбитим променем.

Чим менша товщина основного металу, тим більший кут введення променя необхідний для контролю шва, бо із зменшенням товщини δ ширина b «підсилення» трохи падає; при цьому для прозвучування шва прямим променем завжди потрібен більший кут введення променя, ніж для прозвучування того ж шва променем, відбитим від протилежної поверхні основного металу.

Як вказувалося вище, задовільні результати при контролі дають щупи з кутами введення променя менше 70° . У зв'язку з цим при існуючій конструкції випромінювачів є можливим прозвучування прямим променем стикових швів металу завтовшки більше 20-25 мм. Шви металу меншої товщини можуть бути прозвучені тільки променем, що зазнав одне або декілька віддзеркалень в основному металі.

Значення мінімального кута введення променя можна визначити по формулах (34) і (35) або по графіках.

Шви завтовшки 8-25 мм, контролюють випромінювачем з кутом

введення променя $\alpha = 65 - 70^\circ$ ($\beta = 50^\circ$). При цьому нижня частина шва прозвучується двічі відбитим променем, а верхня – одноразово відбитим (дивись рис. 2.1,г).

У тих випадках, коли для металу завтовшки 22, 24 і 25 мм ширина валика «підсилення» з боку поверхні, по якій переміщують випромінювач, не перевищує відповідно 8, 12 і 15 мм, нижня частина перетину шва може бути прозвучена прямим променем, який випромінюється випромінювачем з кутом призми $\beta = 50^\circ$.

Шви листів завтовшки менше 8 мм можуть бути прозвучені променем, що зазнав багатократного віддзеркалення в основному металі. Мінімальне число віддзеркалень, що зазнає ультразвуковий промінь в основному металі до входу в шов визначається за формулою

$$n_{\min} = \frac{d}{\delta \cdot \operatorname{tg} \alpha}, \quad (2.5)$$

Де d – відстань від центру випромінювання до передньої грані випромінювача; δ – товщина основного металу; α – кут введення променя.

Підставивши числові значення отримаємо

$$n_{\min} = \frac{6}{5 \cdot \operatorname{tg} 67^\circ} = 0,6 \approx 1.$$

При контролі стикових швів будь-якої товщини кут введення променя і спосіб прозвучування визначають зону переміщення випромінювача.

При прозвучуванні шва прямим променем випромінювач переміщують від валика «підсилення» на відстань (дивись рисунок 2.1, б, в)

$$L_{\max} \approx \delta \cdot \operatorname{tg} \alpha - d, \quad (2.6)$$

$$L_{\max} \approx 5 \cdot \operatorname{tg} 67^\circ - 6 = 4,72 \approx 5 \text{ мм}$$

Відстань L_{\max} легко визначити за шкалою глибиноміра або по координатній лінійці. Для цього на шкалі «Н», яка відповідає вживаному випромінювачу, треба встановити проти візирної лінії значення товщини металу δ , а на шкалі «L», яка відповідає тому ж випромінювачу, прочитати

відстань L_{\max} .

У разі контролю шва одноразово або багаторазово відбитим променем випромінювач переміщують в зоні, обмеженій мінімальною L_{\min} і максимальною L_{\max} відстанями від валика «підсилення»:

$$L_{\min} \approx n \cdot \delta \cdot \operatorname{tg} \alpha - d + 3 \text{ мм} = A_{\min} + 3 \text{ мм}; \quad (2.7)$$

$$L_{\max} \approx (n+1) \cdot \delta \cdot \operatorname{tg} \alpha - d, \quad (2.8)$$

де n – число віддзеркалень ультразвукового променя в металі; δ – товщина основного металу; d – відстань від центру випромінювання випромінювача до передньої грані щупа; α – кут введення променя.

Підставивши приблизні значення отримаємо

$$L_{\min} \approx 1 \cdot 5 \cdot \operatorname{tg} 67^{\circ} - 6 + 3 = 7,72 \approx 8 \text{ мм},$$

$$L_{\max} \approx (1+1) \cdot 5 \cdot \operatorname{tg} 67^{\circ} - 6 = 15,4 \text{ мм}.$$

2.1.3 Ультразвукова дефектоскопія кутових зварних з'єднань

Кутові шви зварного з'єднань довгий час в основному контролювали зовнішнім оглядом, вимірюванням і шляхом нагляду за дотриманням встановленої технології в процесі виготовлення конструкції. Надійніші методи контролю, що визначають наявність або відсутність внутрішніх дефектів в кутових швах без руйнування конструкції, в промисловості майже не застосовували.

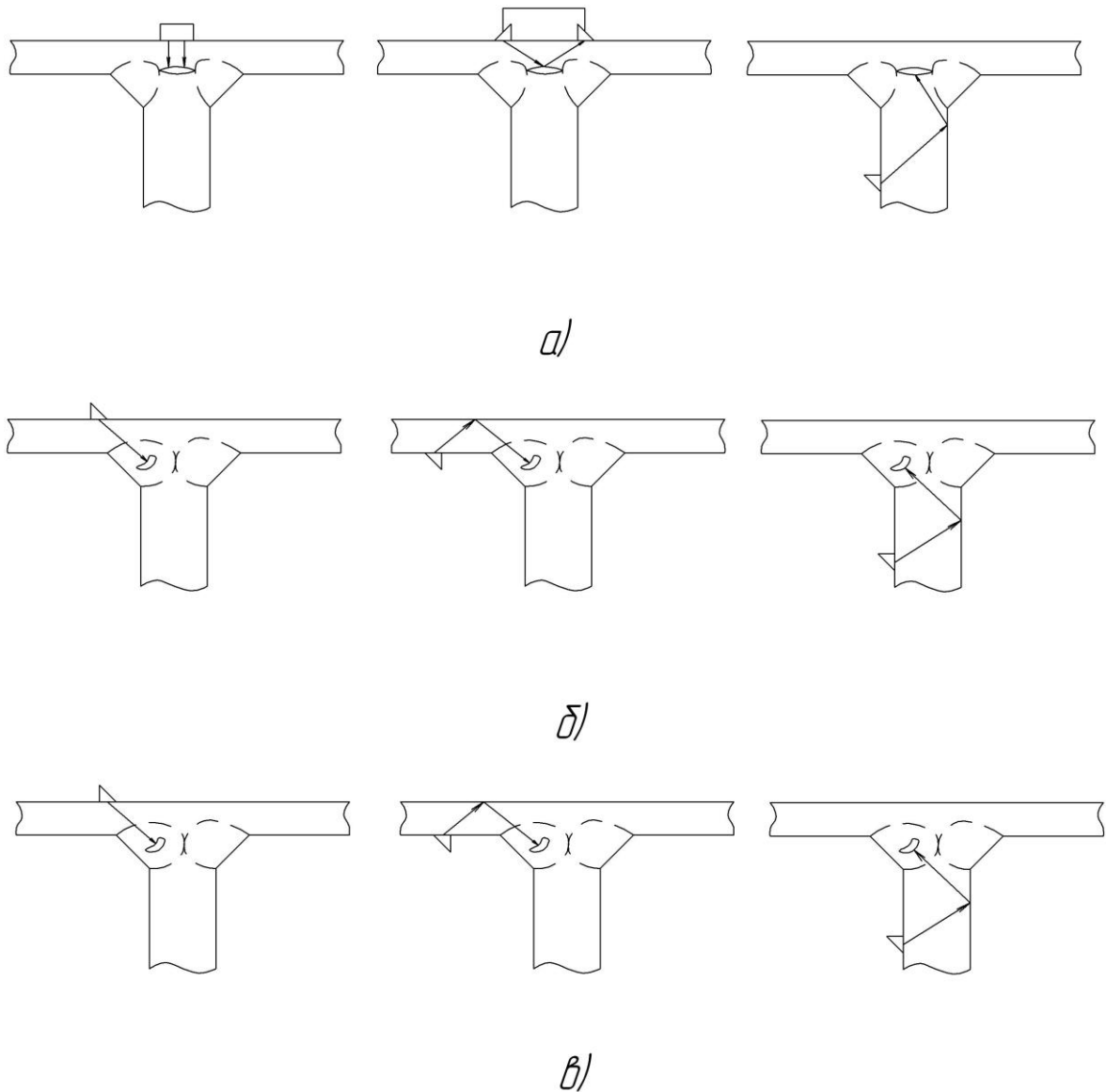
Разом з тим в кутових швах можуть бути внутрішні дефекти, які неможливо виявити зовнішнім оглядом у вигляді пор, шлакових включень, непроварів і тріщин, які в деяких випадках знижують міцність з'єднань, особливо при дії вібраційних навантажень.

Розроблені останнім часом апаратура і методика дозволили застосувати для контролю якості кутових швів метод імпульсної ультразвукової дефектоскопії.

В даний час ультразвукова дефектоскопія є єдиним методом, що виявляє

в кутових швах таврових і хрестових з'єднань тріщини з розкриттям менше 0,2 мм і непровари в корені шва.

На рис. 2.2 приведені схеми прозвучування кутових швів, які, як показали дослідження, практично можуть бути застосовані для виявлення внутрішніх дефектів [6].



а – непровару в корені шва; б – поздовжніх тріщин; в – пор і шлаку
Рисунок 2.2 – Схеми прозвучування кутових швів при виявленні різних дефектів

Найбільш доцільним є метод введення ультразвукового променя в шов через основний метал дотичного листа (схема 3), оскільки він дозволяє виявити всі види внутрішніх дефектів в кутових швах таврових і хрестових з'єднань. При цьому кут введення коливань повинен бути таким, щоб напрям променя приблизно був перпендикулярним до перетину, в якому площа дефектів максимальна. Аналіз геометрії розповсюдження променя показує, що прозвучування наплавленого металу шва з катетами K_1 і K_2 при товщині приварюваного листа δ може бути здійснено одним випромінювачем з кутом введення променя α_1 або послідовно двома випромінювачами з кутами введення променя α_1 і α_2 (рис. 2.3).

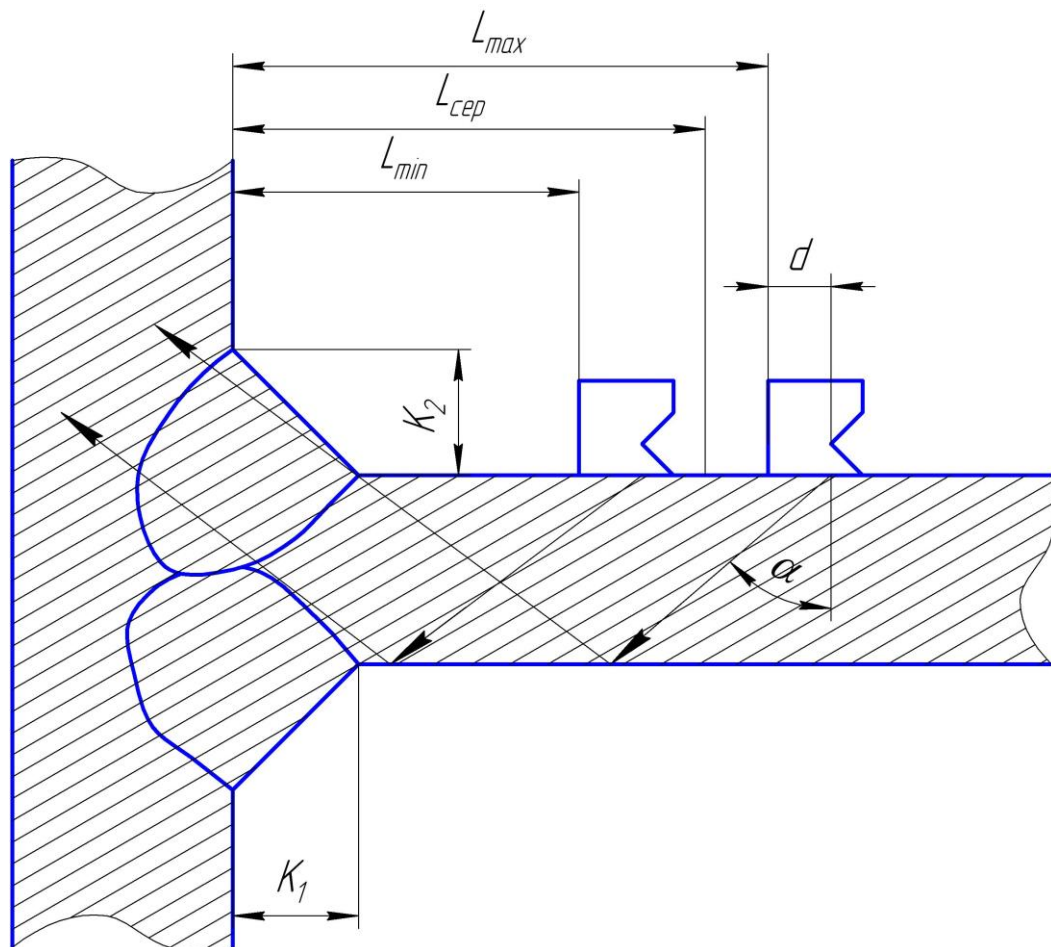


Рисунок 2.3 – Схема контролю кутового шва

Кут введення променя α визначається рівністю:

$$\operatorname{tg} \alpha_1 \approx \frac{K_1}{K_2}. \quad (2.9)$$

Оскільки звичайно $K_1 \approx K_2$, то $\alpha_1 \approx 45^\circ$. Випромінювачем з кутом введення променя $\alpha_1 = 45^\circ$ повністю прозвучується кутовий шов, для якого справедливо співвідношення

$$2 \cdot K \leq \delta. \quad (2.10)$$

Останній вираз практично має місце при $\delta = 30$ мм. При товщині $\delta < 30$ мм випромінювачем з кутом введення променя $\alpha_1 = 45^\circ$ прозвучується лише частина шва, заштрихована на рисунку 2.3 суцільними лініями. Решта частини шва, заштриховані пунктирними лініями, можуть бути прозвучені випромінювачем з кутом введення променя $\alpha_2 > \alpha_1$. Мінімальна величина кута α_2 , яка забезпечує надійний контроль об'єму шва, заштрихованого пунктирними лініями, визначається з рівності:

$$\operatorname{tg} \alpha_2 \approx \frac{2 \cdot K_1}{\delta}. \quad (2.11)$$

При контролі випромінювач переміщують в межах, які визначаються мінімальною L_{\min} і максимальною L_{\max} відстанями його від полиці (дивись рисунок 2.3). Ці відстані можуть бути визначені по формулах:

$$L_{\min} \approx \delta \cdot \operatorname{tg} \alpha - d + K_1 + 3\text{мм} = A_{\min} + K_1 + 3\text{мм}; \quad (2.12)$$

$$L_{\max} \approx 2 \cdot \delta \cdot \operatorname{tg} \alpha - d + K_1 = A_{\max} + K_1. \quad (2.13)$$

Відстань від випромінювача до полиці, при якому ультразвуковий промінь проходить через вісь симетрії кутового з'єднання визначається так:

$$L_{cp} \approx 1,5 \cdot \operatorname{tg} \alpha - d. \quad (2.14)$$

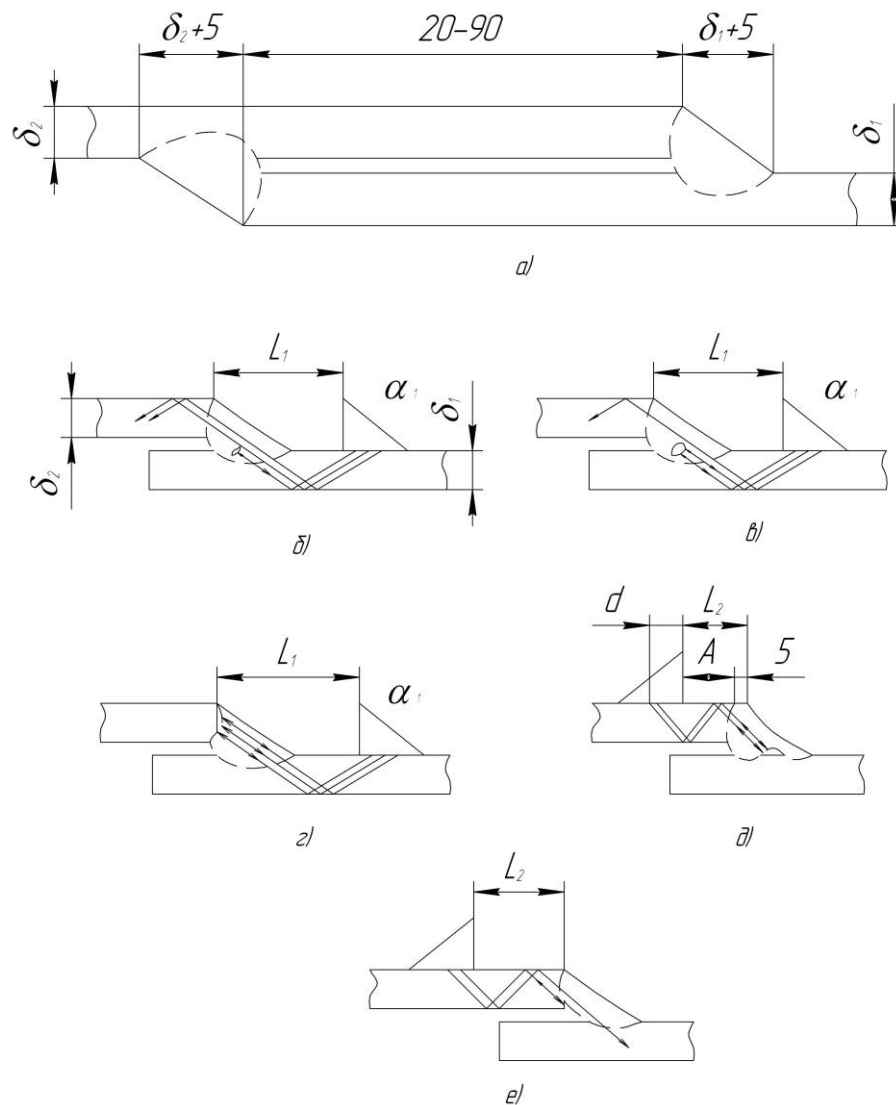
Відстані L_{cp} , A_{\min} , A_{\max} визначають за шкалою глибиноміра. Так, наприклад, для визначення L_{cp} потрібно поставити на шкалі глибиноміра «Н», яка відповідає випромінювачу, який застосовується, число, рівне $1,5 \cdot \delta$, і прочитати за шкалою «L» для того ж випромінювача шукану величину.

При переміщенні випромінювача не рекомендується наближати його до

шва ближче, ніж на відстань L_{\min} , оскільки інакше можуть з'явитися відбиті імпульси від дефектів в протилежному шві.

2.1.4 Контроль зварних швів внаклад

Ультразвукова дефектоскопія зварного з'єднань внаклад (рис. 2.4,а) знаходить застосування при контролі якості зварки вагонних візків, мостових кранів і інших металоконструкцій [7].



а – типові розміри; б – тріщин; в – газових і шлакових включень; г – непровару в торці листа; д – непровару в кромці нижнього листа; е – непровару в куті верхнього листа

Рисунок 2.4 – Типові розміри зварного розміру внаклад і схеми прозвучування шва при виявленні дефектів

Прозвучування швів завтовшки 8-20 мм доцільно проводити відбитим променем, використовуючи для цього спочатку випромінювач з кутом введення променя $\alpha_1 \approx 60-70^\circ$ ($\beta \approx 50^\circ$), а потім – випромінювач з кутом $\alpha_2 \approx 40^\circ$ ($\beta \approx 30^\circ$). Випромінювачі при контролі переміщують паралельно шву на певній відстані від кута верхнього листа. Для виявлення різними чином орієнтованих дефектів – випромінювач систематично повертають в обидві сторони на $5-10^\circ$.

При прозвучуванні випромінювач з кутом призми $\beta = 50^\circ$ розташовують на поверхні нижнього листа на відстані від шва:

$$L_1 \approx (2 \cdot \delta_1 + 0,5 \cdot \delta_2) \cdot \operatorname{tg} \alpha_1 - d, \quad (2.15)$$

$$L_1 \approx (2 \cdot 20 + 0,5 \cdot 20) \cdot \operatorname{tg} 67^\circ - 6 \approx 101 \text{ мм.}$$

Цим випромінювачем забезпечується виявлення тріщин (рисунок 2.4, б), газових і шлакових включень (рис. 2.4, в), непроварів по торцю верхнього листа (рис. 2.4, г).

Дефекти у вигляді непровару по кромці нижнього листа (рис. 2.4, д) і непроварення кута верхнього листа (рис. 2.4, е) можуть бути виявлені випромінювачем з кутом $\beta = 30^\circ$, що розташовується на верхньому листі на відстані від шва

$$L_2 = 2 \cdot \delta_2 \cdot \operatorname{tg} \alpha_2 - d + 5 \text{ мм} = A + 5 \text{ мм}, \quad (2.16)$$

$$L_2 = 2 \cdot 20 \cdot \operatorname{tg} 40^\circ - 6 + 5 = 32,5 \text{ мм.}$$

Величини L_1 і A можуть бути легко визначені за шкалою глибиноміра або по координатній лінійці.

Для уникнення реєстрації луно-сигналів від нерівностей поверхні шва, а також від торця листа доцільно випромінювач розміщувати в тримачі з обмежувачем, а прозвучування проводити дефектоскопом, що працює в режимі «Контроль по ділянках». Величина ділянки повинна бути на 2-3 мм більша від висоти шва δ_2 . Початок ділянки повинен розташовуватися на глибині $2\delta_2-3$ мм при розташуванні випромінювача на нижньому листі і $2\delta_2$ при розташуванні випромінювача на верхньому листі.

2.2 Розробка компонентів приладу для ультразвукового контролю зварних швів будівельних конструкцій

2.2.1 Розробка функціональної схеми ультразвукового компактного дефектоскопу для контролю зварних швів будівельних конструкцій

Всі елементи електричної схеми повинні працювати узгоджено в часі. Для того, щоб це забезпечити служить генератор тактових імпульсів, з якого будуть починатись всі процеси в функціональній схемі.

Генератор тактових імпульсів потрібен для того, щоб виробляти імпульси тривалістю $\tau = 4$ мкс і періодом 67 мкс.

Після генератора тактових імпульсів потрібно розмістити генератор зондуючих імпульсів, який починає виробляти зондуючі імпульси (радіоімпульси) з початком тактового імпульсу і закінчує в момент закінчення тактового імпульсу.

Радіоімпульс повинен запускати одновібратор затримки сигналізації дефекту, який розміщений після генератора зондуючих імпульсів і підсилювача потужності.

Після цього даний імпульс потрібно продиференціювати.

Продиференційований імпульс в свою чергу повинен запускати одновібратор зони контролю. По довжині імпульсу одновібратора зони контролю визначають відстань до дефекту.

Після цього поступає відбитий сигнал (луно-імпульс) по початку якого спрацьовує схема порівняння.

Якщо в зоні контролю матеріалу знаходиться дефект, тоді відбитий від нього радіоімпульс перетворюється п'єзопластинами і підсилюється широкосмуговим підсилювачем, після чого потрапляє на детектор.

Початок тактового імпульсу переводить тригер у положення „1”, а в момент спрацювання схеми порівняння тригер знову повертається в стан логічного „0”.

Після тригера потрібно розмістити ключ, який би відкривався і

пропускав імпульси в той момент, поки тригер знаходиться в положенні логічної „1” і, коли тригер переходить в стан логічного „0”, ключ повинен закритися і більше не пропускати імпульси з генератора стандартних імпульсів.

Імпульси, які повинен пропускати ключ, треба подавати на нього з генератора стандартних імпульсів, який виробляє лічильні імпульси стабілізованої частоти.

Після ключа дані імпульси потрапляють на лічильник, який підраховує їх і подає сигнал на індикатор, тобто семисегментні індикатори.

В момент, коли спрацьовує схема порівняння, також запускається одновібратор світлової сигналізації, який виробляє імпульс певної довжини.

Даний імпульс поступає на індикатор світлової сигналізації (світлодіод), який спрацьовує на протязі імпульсу світлової сигналізації.

Після одновібратора світлової сигналізації потрібно розмістити розширювач імпульсу сигналізації, який би спрацьовував у момент спрацювання схеми порівняння і виробляв би імпульси більшої тривалості.

Після нього потрібно розмістити генератор звукової частоти, який виробляє звукові коливання низької частоти протягом тривалості імпульсу сигналізації.

Ці звукові коливання повинні потрапляти на головні телефони, які будуть сигналізувати про наявність дефекту одночасно з світлодіодом.

Після розширювача імпульсу сигналізації потрібно розмістити блок обнулення, який би подавав сигнал логічного „0” на лічильник для того, щоб робити обнулення системи.

Порядок встановлення кожного з блоків показано на листі формату А1 МР.ММТ-16.01.00.000 Е1, часова діаграма кожного блоку даного приладу зображена на листі формату А1 МР.ММТ-16.01.00.000.

2.2.2 Розробка електричної принципової схеми ультразвукового компактного дефектоскопу

Електрична принципова схема дефектоскопу показана на МР.ММт-16.01.00.000 ЕЗ. Блок живлення пристрою створює батарея „Крона” GB1 з напругою 9 В. Стабілізатор на стабілітроні VD7 і транзисторі VT6 і перетворювач на трансформаторі TV2 підвищують напругу джерела живлення до 250 В. Висока напруга з виходу перетворювача подається тільки на генератор радіоімпульсів. Час неперервної роботи приладу від внутрішньої батареї „Крона” близько 1,5 години.

В генераторі тактових імпульсів працює мікросхема DA1 разом з обв'язуючими елементами, яка через трансформатор TV2 збуджує п'єзоелементи ZQ2, ZQ3 і ZQ4.

Імпульс постійного струму, який виробляється в момент генерації тактових імпульсів, проходить через мікросхему DA1 і збуджує ZQ3 в режимі „Пошук” або ZQ2 і ZQ4 в режимі „Оцінка” (натиснута кнопка SB1) радіоімпульс, довжина якого на рівні 0,5 складає 0,4 мкс. Чутливість приладу в режимі „Оцінка” встановлюють змінним резистором R19, який включений в контур. Радіоімпульс, знятий з нижньої частини (по схемі) трансформатора TV2, перетворюється діодом VD4 в імпульс позитивної полярності, який через конденсатор C5 і діод VD2 запускає мультівібратор затримки сигналізатора дефектів, який зібраний на транзисторах VT1 і VT2. Тривалість імпульсу мультівібратора встановлюють резистором R10 в емітерній ланці транзистора VT1.

Продиференційований імпульс, який пройшов через транзистор VT3, включений інвертором, через конденсатор C11 і діод VD3 запускає одновібратор „зони контролю” сигналізатора на транзисторах VT4 і VT5. Тривалість імпульсу одновібратора, по якій визначають відстань до дефекту, встановлюють змінним резистором R18. З колектора транзистора VT5 імпульс через конденсатор C14 подається на базу транзистора VT11, який створює з

транзистором VT12 пристрій співпадіння сигналів сигналізатора.

Але, допустимо, що в „зоні контролю” матеріалу виявився дефект. В цьому випадку відбитий від нього радіоімпульс перетворюється п'єзопластинами ZQ2, ZQ3 і ZQ4 і підсилюється широкосмуговим трьохкаскадним підсилювачем на транзисторах VT7, VT8 і VT9. Діоди VD5 і VD6, які утворюють двосторонній обмежувач змінного струму, захищають підсилювач від перенагрузки. Далі підсилений радіоімпульс детектується і обмежується по амплітуді транзистором VT9 сигналізатора дефектів і через конденсатор C30 діє на базу транзистора VT12 пристрою співпадіння. Межу обмеження імпульсів в детекторі-обмежувачі встановлюють змінним резистором R47.

Тригер на мікросхемі DD9.3, DD9.4 керує схемою вимірювання часу проходження імпульсу. Зондуючий імпульс переводить тригер у положення „1” і тоді відкривається ключ на мікросхемі DD1.3, який пропускає стабілізовані кварцовим резонатором ZQ1 стандартні імпульси з генератора на мікросхемах DD1.1, DD1.2. Стандартні імпульси після ключа DD1.3 попадають на трьохрозрядний лічильник на мікросхемах DD3, DD5, DD7, вихідні сигнали з яких висвічують результати вимірювань на індикаторах HG1, HG2, HG3. Активізація рідкокристалічних індикаторів HG1, HG2 і HG3 здійснюється генератором низькочастотних коливань на мікросхемі DD6.3, DD6.4.

Позитивний імпульс, який знімається з колектора транзистора, проходить через конденсатор і діод і запускає одновібратор світлового індикатора, а через нього розширювач імпульсів з мультівібратором DD7 з підсилювачем потужності, який генерує коливання звукової частоти. При цьому короткочасно загоряється світлодіод VD1 і звучать телефони, які сигналізують про наявність дефекту в „зоні контролю”.

Резистори R4, R15 і конденсатор C12 створюють пристрій часової варіації амплітуди радіоімпульсів, які генеруються. Він формує імпульси від'ємної експоненційної напруги, що зростає, які через резистор R15 і

конденсатор С4 поступають на вхід підсилювача, тим самими вирівнюючи чутливість приладу по глибині залягання дефектів.

2.2.2.1 Розрахунок підсилювача відбитих сигналів

Електронна схема, в тому числі підсилювач, повинна бути розрахована на пропускання сигналу в широкій смузі частот від низьких до ультразвукових частот.

Для підсилення відбитого сигналу, прийнятого п'єзоперетворювачем, до рівня спрацювання схеми порівняння потрібен широкосмуговий підсилювач з коефіцієнтом підсилення по напрузі:

$$K_U = \frac{U_{\text{вих.}}}{U_{\text{вх.}}}; \quad (2.17)$$

де $U_{\text{вих.}}$ – вихідна напруга підсилювача, яка повинна бути не меншою нижньої межі спрацювання схеми порівняння, яка рівна 2В; $U_{\text{вх.}}$ – величина вхідного сигналу з п'єзоперетворювача, приблизно рівна 0,02 В.

Отже, $K_U \geq 100$.

Визначимо орієнтовну кількість каскадів підсилювача. При цьому можна вважати, що кожен каскад підсилювача при під'єднанні транзистора по схемі із спільним емітером повинен забезпечити підсилення приблизно на 20 дБ.

Звідси робимо висновок, що наш підсилювач повинен бути двохкаскадним.

Для широкосмугових підсилювачів використовують високочастотні транзистори з високою граничною частотою підсилення струму $f_{\text{гр}}$. Транзистори (в нашому випадку малої потужності) вибираємо так, щоб виконувалась умова:

$$f_e \approx 0,1 \cdot f_{\text{гр}}. \quad (2.18)$$

Оскільки в нас робоча частота зондуючих імпульсів $f_p = 5$ МГц повинна бути для надійності всередині частотного діапазону $f_{\text{н}} \dots f_{\text{в}}$ підсилювача, то $f_{\text{в}} \approx$

10 МГц.

$$f_{cp} \geq 10 \cdot f_e = 100 \text{ МГц} \quad (2.19)$$

В такому випадку прекрасно підійдуть широко використовувані транзистори типу КТ 315, в яких $f_{гр} = 250$ МГц, а мінімальний коефіцієнт підсилення по струму $h_{21e} = 20$.

Розрахуємо режим роботи транзистора, насамперед, перевіримо чи допустима напруга між колектором і емітером транзистора не перевищує напруги живлення $U_{ж} = 9$ В.

$$U_{ке\max} > U_{ж}; \quad (2.20)$$

Для всіх транзисторів типу КТ 315 В $U_{ке\max} = 25$ В. Величина допустимого струму колектора визначається так:

$$I_{к\max} > (1,5 \dots 2) \cdot I_{твхн}. \quad (2.21)$$

Визначаємо величину струму спокою в ланці колектора за формулою:

$$I_{кр} \approx 1,4 \cdot I_{твхн}. \quad (2.22)$$

Підставивши значення отримаємо:

$$I_{кр} \approx 1,4 \cdot 0,001 = 1,4 \text{ мА}.$$

Знаходимо опір навантаження в ланці колектора. При виборі величини опору R_3 в ланці колектора необхідно задовольняти дві вимоги: з одного боку, бажано, щоб опір R_3 був якомога більшим у порівнянні з величиною вхідного опору наступного каскаду. З іншого боку, збільшення R_3 при заданому струмі колектора призводить до того, що спад напруги на цьому опорі збільшується, а напруга між колектором і емітером $U_{ке}$ зменшується до недопустимо малої величини [8].

З урахуванням цих вимог розрахункова формула для визначення R_3 (рис. 2.5) має вигляд:

$$R_3 = \frac{0,4 \cdot U_{ж}}{I_{кр}}. \quad (2.23)$$

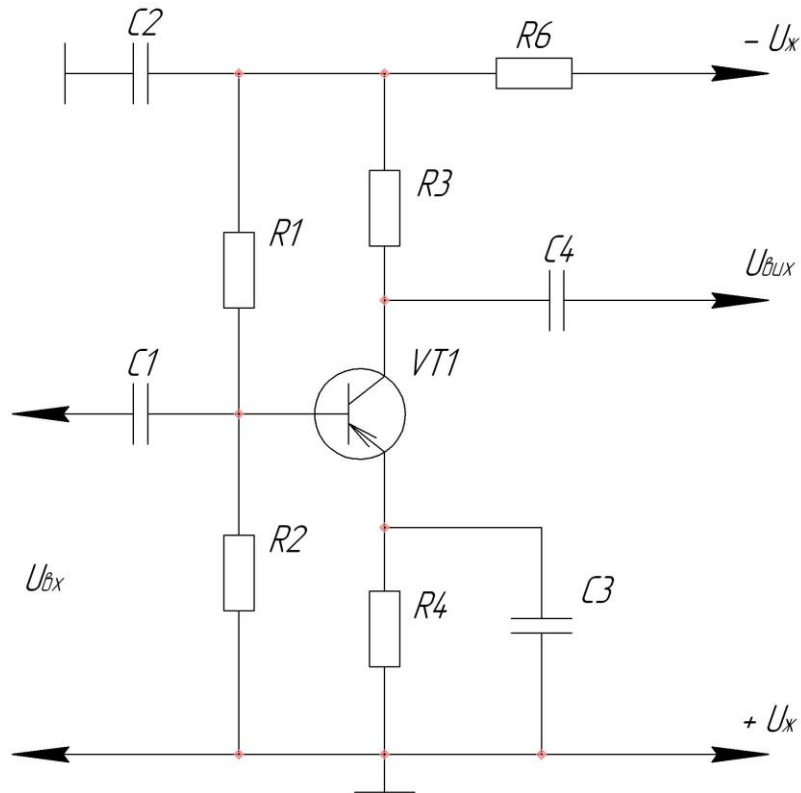


Рисунок 2.5 – Схема резистивного каскаду із загальним емітером

Підставимо числові значення і отримаємо:

$$R_3 = \frac{0,4 \cdot 9}{1,4 \cdot 10^{-3}} \approx 2571 \text{ Ом.}$$

Потужність, яка розсіюється на резисторі R_3 визначається так:

$$P_{R_3} = I_{кр}^2 \cdot R_3. \quad (2.24)$$

Отримаємо

$$P_{R_3} = (0,0014)^2 \cdot 2571 = 0,005 \text{ Вт.}$$

Визначаємо опір резистора R_4 в ланці термостабілізації за формулою:

$$R_4 \approx \frac{0,2 \cdot U_{жс}}{I_{кр}}. \quad (2.25)$$

Звідси

$$R_4 = \frac{0,2 \cdot 9}{0,0014} \approx 1286 \text{ Ом.}$$

Потужність, яка розсіюється на резисторі R_4 визначається так:

$$P_{R_4} = I_{ep}^2 \cdot R_4. \quad (2.26)$$

При цьому приймають струм емітера в режимі спокою I_{ep} приблизно рівним $I_{кр}$. Отже,

$$P_{R_4} = (0,0014)^2 \cdot 1286 \approx 0,0025 \text{ Вт}.$$

Враховуючи знайдені значення R_3 , R_4 , P_{R_3} і P_{R_4} вибираємо стандартні значення і тип резисторів: R_3 – МЛТ-0,125-2,4 кОм $\pm 10\%$, R_4 – МЛТ-0,125-1,3 кОм $\pm 10\%$.

Знаходимо ємність конденсатора C_3 (дивись рисунок 2.5).

$$C_3 = \frac{10^6}{2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot 0,1 \cdot R_4}. \quad (2.27)$$

Отримаємо

$$C_3 = \frac{10^6}{2 \cdot 3,14 \cdot 10^6 \cdot 0,1 \cdot 1300} = 1220 \text{ нФ}.$$

Робоча напруга конденсатора C_3 повинна перевищувати максимальну напругу на резисторі R_4 . Вибираємо такий конденсатор – К73-5-0,066 мкФ-16 В.

Знаходимо напругу між колектором і емітером транзистора в режимі спокою.

$$U_{кер} = U_{жс} - I_{кр} \cdot R_3 - I_{ep} \cdot R_4. \quad (2.28)$$

Отже,

$$U_{кер} = 9 - 0,0014 \cdot 2400 - 0,0014 \cdot 1300 = 3,82 \text{ В}.$$

В сімействі вихідних статичних характеристик вибраного транзистора включеного по схемі зі спільним емітером (рис. 2.6, а), відмічаємо положення робочої точки Р з координатами $U_{кер}$ і $I_{кр}$.

Знайденому положенню робочої точки відповідає струм бази $I_{бр}$. Отримане значення струму бази дозволяє визначити положення робочої точки Р' на вхідній характеристиці транзистора, яка знята при $U_{ке} \neq 0$ (рис. 2.6, б), напруга спокою ділянки база-емітер $U_{бер}$ і вхідний опір змінному струму

транзистора каскаду, який розраховується $R_{вх}$.

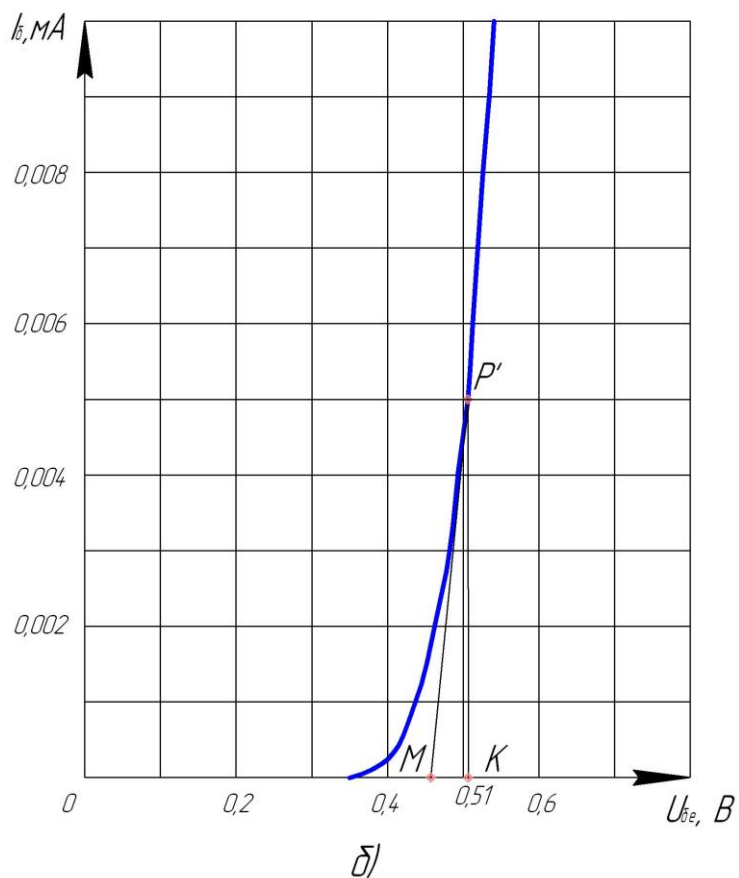
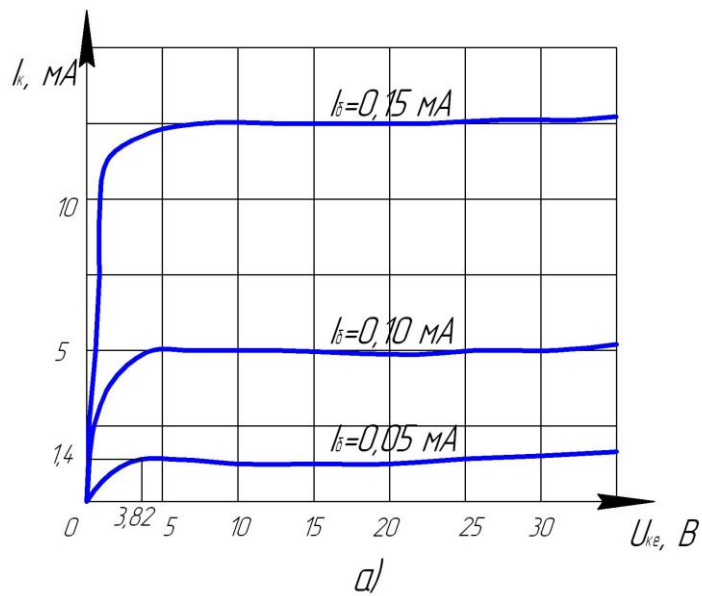


Рисунок 2.6 – Визначення режиму роботи попереднього каскаду в сімействі вихідних характеристик транзистора (а) і по графіку вхідної характеристики (б)

Для знаходження $R_{вх}$ необхідно провести дотичну до точки спокою P' (рис. 2.6, б) і знайти відношення:

$$R_{вх} = \frac{MK}{KP'}. \quad (2.29)$$

Підставивши значення отримаємо

$$R_{вх} = \frac{5}{50} = 0,1 Ом.$$

Визначаємо елементи подільника напруги в ланці бази R_1 і R_2 (рис. 2.5).

Приймаємо спад напруги на опорі резистора R_5 фільтра

$$\Delta U_{R5} = (0,1 \dots 0,2) \cdot U_{жс}. \quad (2.30)$$

Підставимо числові значення і отримаємо:

$$\Delta U_{R5} = 0,15 \cdot 9 = 1,35 В.$$

Знаходимо напругу, яка підводиться до подільника R_1 , R_2

$$U_{\delta} = U_{жс} - \Delta U_{R5}. \quad (2.31)$$

Звідси

$$U_{\delta} = 9 - 1,35 = 7,65 В.$$

Вибираємо струм в ланці подільника з умови

$$I_{\delta} = (2 \dots 5) \cdot I_{\deltaр}. \quad (2.32)$$

Отримаємо

$$I_{\delta} = 4 \cdot 0,05 \cdot 10^{-3} = 0,02 мА.$$

Визначаємо R_1 і R_2 за формулами

$$R_1 = \frac{U_{\delta} - \Delta U_{R4} - U_{\deltaер}}{I_{\deltaр} + I_{\delta}}; \quad (2.33)$$

$$R_2 = \frac{\Delta U_{R4} + U_{\deltaер}}{I_{\delta}}. \quad (2.34)$$

Спад напруги на резисторі R_4 приймають рівним

$$\Delta U_{R4} \approx 0,1 \cdot U_{жс}. \quad (2.35)$$

Отже,

$$\Delta U_{R4} \approx 0,1 \cdot 9 = 0,9 В.$$

Тепер обчислимо значення опорів R_1 і R_2

$$R_1 = \frac{7,65 - 0,9 - 0,51}{0,00005 + 0,0002} = 24960 \text{ Ом};$$

$$R_2 = \frac{0,9 + 0,51}{0,0002} = 7050 \text{ Ом}.$$

Обчислимо потужність, яка розсіюється на опорах R_1 і R_2 за формулами:

$$P_{R1} = I_o^2 \cdot R_1; \quad (2.36)$$

$$P_{R2} = I_o^2 \cdot R_2. \quad (2.37)$$

Підставивши числові значення отримаємо

$$P_{R1} = (0,0002)^2 \cdot 24960 = 0,001 \text{ Вт};$$

$$P_{R2} = (0,0002)^2 \cdot 7050 = 0,0003 \text{ Вт}.$$

Отже, вибираємо такі типи резисторів: для R_1 – МЛТ-0,125-24 кОм \pm 10%, для R_2 – МЛТ-0,125-6,8 кОм \pm 10%.

Розраховуємо елементи розв'язного фільтра

$$R_5 = \frac{\Delta U_{R5}}{I_o + I_{кр}}; \quad (2.38)$$

$$C_2 = \frac{(10 \dots 50)}{f_n \cdot R_5}. \quad (2.39)$$

Звідси

$$R_5 = \frac{1,35}{0,0002 + 0,0014} = 844 \text{ Ом};$$

$$C_2 = \frac{40}{10^6 \cdot 844} = 0,047 \text{ мкФ}.$$

Визначимо потужність розсіювання на резисторі R_5 за формулою:

$$P_{R5} = (I_o + I_{кр})^2 \cdot R_5. \quad (2.40)$$

Отримаємо

$$P_{R5} = (0,0002 + 0,0014)^2 \cdot 844 = 0,0014 \text{ Вт}.$$

Отже, вибираємо тип резистора МЛТ-0,125-820 Ом \pm 10%.

Знаходимо амплітудне значення струму на вході каскаду

$$I_{max.} = \frac{1,2 \cdot I_{max.н.}}{h_{21emin}} \quad (2.41)$$

Звідси

$$I_{max.} = \frac{1,2 \cdot 0,001}{20} = 0,06 \text{ мА.}$$

Знаходимо коефіцієнт підсилення каскаду по напрузі на середніх частотах по формулі

$$K_{Uc} = \frac{h_{21emin} \cdot R_{екв.вих.}}{R_{ex}} \quad (2.42)$$

де $R_{вх}$ – вхідний опір каскаду, який розраховується;

$R_{екв.вих.}$ – еквівалентний вихідний опір даного каскаду, який визначається за формулою:

$$R_{екв.вих.} = \frac{R_3 \cdot R_{2н} \cdot R_{ex.н.}}{R_{2н} \cdot R_{ex.н.} + R_3 \cdot R_{ex.н.} + R_3 \cdot R_{2н}}; \quad (2.43)$$

де $R_{2н}$ – опір резистора R_2 в ланці подільника наступного каскаду.

Підставимо числові значення і отримаємо

$$R_{екв.вих.} = \frac{2400 \cdot 6800 \cdot 0,9}{6800 \cdot 0,9 + 2400 \cdot 0,9 + 2400 \cdot 6800} = 0,9 \text{ Ом.}$$

Знаходимо коефіцієнт підсилення каскаду по напрузі на середніх частотах

$$K_{Uc} = \frac{20 \cdot 0,9}{0,1} = 180.$$

Знаходимо мінімальне значення коефіцієнта підсилення каскаду по потужності:

$$K_{Pрозр} = h_{21emin} \cdot K_{Uc}, \quad (2.44)$$

або в децибелах

$$K_{Pрозр[дб]} = 10 \cdot \lg K_{Pрозр}. \quad (2.45)$$

Звідси

$$K_{Pрозр} = 20 \cdot 180 = 3600,$$

і в децибелах

$$K_{\text{розр[дб]}} = 10 \cdot \lg 3600 = 36 \text{ дб.}$$

Ємність роздільного конденсатора C_4 , який з'єднує розрахований каскад з наступним (рис. 2.5), знаходимо по формулі:

$$C_4 = \frac{10^6}{2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot (R_{\text{екв.вх.}} + R_{\text{вх.н.}}) \cdot \sqrt{M_n^2 - 1}}. \quad (2.46)$$

Підставивши числові значення отримаємо:

$$C_4 = \frac{10^6}{2 \cdot 3,14 \cdot 10^6 \cdot (0,9 + 0,9) \cdot \sqrt{1,01^2 - 1}} = 0,95 \text{ мкФ.}$$

Далі визначаємо загальний опір колекторної ланки (без врахування спаду напруги на резисторі фільтра)

$$R_{\text{Кзаг.}} = \frac{U_{\text{жс}} - U_{\text{кер}}}{I_{\text{кр}}}. \quad (2.47)$$

Отримаємо

$$R_{\text{Кзаг.}} = \frac{9 - 3,82}{0,0014} = 3700 \text{ Ом.}$$

Оскільки $R_{\text{Кзаг.}}$ є опором колекторного навантаження змінному струму, то

$$R_{\text{Конт.}} = \frac{R_K \cdot R_{\text{вх.н.}}}{R_K + R_{\text{вх.н.}}}, \quad (2.48)$$

де R_K – опір резистора навантаження на ланці колектора ($R_K = R_3$ на рис. 2.5).

Звідси

$$R_{\text{Конт.}} = \frac{2400 \cdot 0,9}{2400 + 0,9} = 0,9 \text{ Ом.}$$

Розрахунок елементів високочастотної емітерної корекції $R_4 C_5$ (рис. 2.7) виконується наступним чином:

Знаходимо граничну частоту вхідної ланки транзистора

$$f_{\text{гр.роб.}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C_{\text{бе}} \cdot R_{\text{екв.в}}}, \quad (2.49)$$

де $C_{\text{бе}}$ – еквівалентна вхідна ємність транзистора, яка включає ємність зворотного зв'язку; $R_{\text{екв.в}}$ – еквівалентний опір на верхніх частотах.

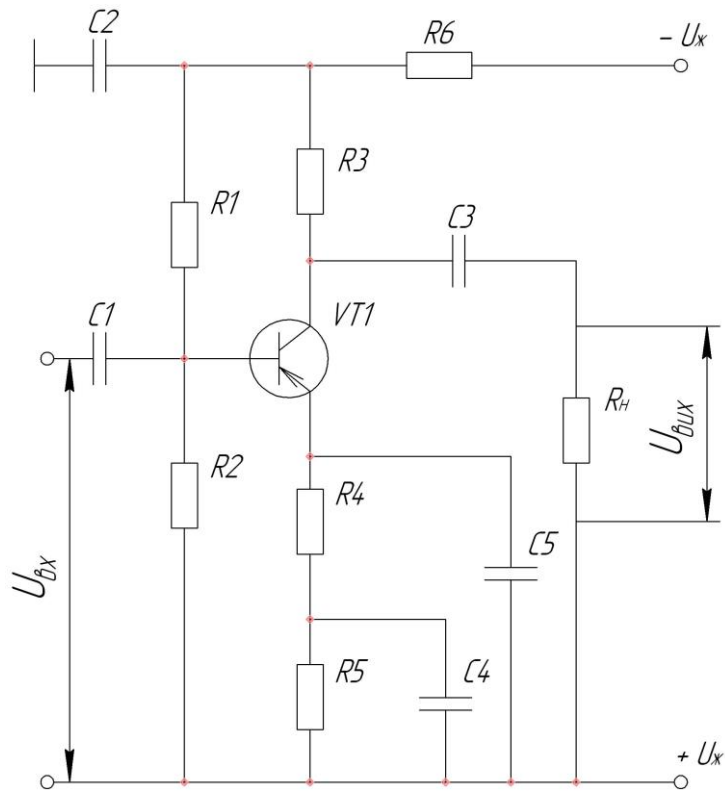


Рисунок 2.7 – Схема широкопasmового підсилювача з високочастотною корекцією частотної характеристики

Значення $C_{\text{бe}}$ знаходимо по формулі

$$C_{\text{бe}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{\text{зп}} \cdot r_e} + C_{\text{к}} \cdot \left(\frac{R_{\text{к}}}{r_e} \right), \quad (2.50)$$

де $C_{\text{к}} = 10 \text{ пФ}$ і

$$r_e \approx \frac{26}{I_{\text{кп}}}. \quad (2.51)$$

Отже,

$$r_e = \frac{26}{1,4} = 18,6 \text{ Ом},$$

звідси

$$C_{\text{бe}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 250 \cdot 10^6 \cdot 18,6} + 10 \cdot 10^{-12} \cdot \left(\frac{2400}{18,6} \right) = 0,013 \text{ мкФ}.$$

Величина $R_{\text{екв.в}}$ визначається з відношення

$$R_{екв.6} \approx \frac{(R_{\alpha} + r_{\delta}) \cdot R_{\alpha.екв.6}}{R_{\alpha} + r_{\delta} + R_{\alpha.екв.6}}, \quad (2.52)$$

де $R_{вх.екв.в} = h_{11e} = 20 \text{ Ом}$ і

$$r_{\delta} = \frac{\tau_{\kappa}}{C_{\kappa}}, \quad (2.53)$$

де $\tau_{\kappa} = 500 \text{ пс}$. Отримаємо

$$r_{\delta} = \frac{500 \cdot 10^{-12}}{10 \cdot 10^{-12}} = 50 \text{ Ом}.$$

Підставляємо числові значення у формулу (2.52) і отримаємо

$$R_{екв.6} = \frac{(0,1 + 50) \cdot 20}{0,1 + 50 + 20} = 14,3 \text{ Ом}.$$

Підставляємо значення $R_{екв.в}$ у формулу (2.49) і отримаємо

$$f_{зр.роб} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,013 \cdot 10^{-6} \cdot 14,3} = 8,4 \text{ МГц}.$$

На графіку (рис. 2.8) залежність глибини зворотного зв'язку A від відношення $f_{в}/f_{гр. роб}$ для різних значень відносного коефіцієнта підсилення на верхніх частотах

$$y_{\epsilon} = \frac{1}{M_{\epsilon}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (2 \cdot \pi \cdot f_{\epsilon} \cdot \tau_{\epsilon})^2}}, \quad (2.54)$$

де

$$\tau_{\epsilon} = 0,0455 \cdot t_i, \quad (2.55)$$

де t_i – довжина імпульсу ($t_i = 10^{-7}$).

Підставивши значення отримаємо, що

$$y_{\epsilon} = \frac{1}{\sqrt{1 + (2 \cdot 3,14 \cdot 10^7 \cdot 0,0455 \cdot 10^{-7})^2}} \approx 0,95.$$

Тепер з графіка (дивись рисунок 2.8) визначаємо, що $A = 1,76$.

Опір резистора R_4 ланки корекції визначаємо по формулі

$$R_4 = \frac{R_{\alpha} + r_{\delta} + r_{\epsilon} \cdot (A - 1)}{1 + h_{21e}}, \quad (2.56)$$

де $h_{21e} = 30$.

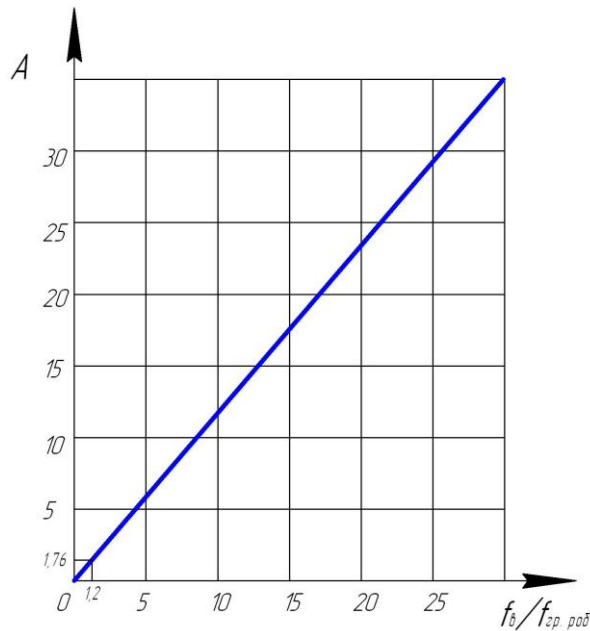


Рисунок 2.8 – Графік для визначення глибини зворотного зв'язку в транзисторних каскадах з емітерною високочастотною корекцією при $u_b = 0,95$

Звідси

$$R_4 = \frac{0,1 + 50 + 18,6 \cdot (1,76 - 1)}{1 + 30} = 16 \text{ Ом.}$$

Вибираємо тип резистора R_4 – МЛТ-0,125-15 Ом $\pm 10\%$.

Визначаємо ємність конденсатора C_5 ланки корекції

$$C_5 = \frac{0,16}{A \cdot R_4 \cdot f_{зр.роб}}. \quad (2.57)$$

Підставивши числові значення отримаємо

$$C_5 = \frac{0,16}{1,76 \cdot 15 \cdot 8,4 \cdot 10^6} = 722 \text{ нФ.}$$

Розрахунок сумарного опору резисторів $R_4 + R_5$ проводимо з умови допустимого спаду напруги на цих резисторах

$$R_4 + R_5 = \frac{0,2 \cdot E_{\kappa}}{I_{кр} + I_{бр}}. \quad (2.58)$$

Отже,

$$R_4 + R_5 = \frac{0,2 \cdot 0,9}{0,0014 + 0,00005} = 1241 \text{ Ом.}$$

Звідси визначимо R_5

$$R_5 = 1241 - R_4. \quad (2.59)$$

Підставимо значення і отримаємо

$$R_5 = 1241 - 15 = 1226 \text{ Ом.}$$

Ємність конденсатора C_5 на рис. 2.7 з врахуванням від'ємного зворотного зв'язку рівна

$$C_4 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot R_5} \cdot \sqrt{\frac{(1 + S \cdot R_5)^2 - M_n^2}{M_n^2 - 1}}, \quad (2.60)$$

де S – крутизна наскрізної динамічної характеристики транзистора з врахуванням зворотного зв'язку, який вноситься резистором R_4 ,

$$S = \frac{1}{R_4 + r_e + \frac{R_{ac} + r_o}{1 + h_{21e}}}. \quad (2.61)$$

Підрахуємо значення S

$$S = \frac{1}{15 + 18,6 + \frac{0,1 + 50}{1 + 30}} = 0,028.$$

Тепер підрахуємо значення C_4

$$C_4 = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 10^6 \cdot 1200} \cdot \sqrt{\frac{(1 + 0,028 \cdot 1200)^2 - 1,01^2}{1,01^2 - 1}} = 0,032 \text{ мкФ.}$$

2.2.3 Розробка конструкції проектного приладу

Оскільки даний прилад призначений для контролю зварних швів будівельних конструкцій у важкодоступних місцях куди великі по габаритах прилади не мають доступу, то першою особливістю, якою повинен він характеризуватись – це компактність, малі габаритні розміри. Наш прилад має такі габаритні розміри 122 x 107 x 44 мм (МР.ММТ-16.01.00.000 СК), що дозволяє проникати ним у важкодоступні місця.

У випадку, якщо оператор дефектоскопа не має можливості задіяти дві руки для контролю зварного шва, даний дефектоскоп має малу вагу і п'єзоперетворювач вмонтований у корпус приладу, що дозволяє тримати прилад в одній руці під час проведення контролю і не має зайвих шнурів.

Також для зручності проведення контролю в приладі передбачено вихід для головних телефонів. В момент виявлення приладом дефекту на головні телефони подається звуковий сигнал, що підвищує ймовірність виявлення дефекту оператором.

На верхній кришці дефектоскопа потрібно розмістити світлодіод, який засвічується в момент виявлення дефекту, що також підвищує ймовірність виявлення браку.

Для того, щоб оператор міг визначити, на якій глибині залягає дефект і його розміри, на передню панель потрібно розмістити цифрове табло, яке складається з трьох світлових семисегментних індикаторів. Три індикатори потрібні для того, щоб можна було визначити глибину залягання дефекту з точністю 0,01 мм, на глибині до 10 мм і 0,1 мм на глибині більше 10 мм.

Також на передній панелі приладу потрібно розмістити регулятор зони контролю, для того, щоб оператор при скануванні зварних швів ультразвуком, виявивши приблизне знаходження дефекту, даним регулятором міг би більш точно визначити його параметри.

Для зручності ручки регулювання зони контролю потрібно розмістити так, щоб оператор взявши дефектоскоп в праву руку за верхню кришку великим пальцем міг регулювати зону контролю. Це призведе до підвищення продуктивності контролю об'єктів.

Ще одною важливою особливістю дефектоскопу повинно бути те, що він може житись від акумуляторної батареї „Крона”, що дозволяє контролювати об'єкти в польових умовах або на великій висоті де немає доступу до електричної мережі.

Для того, щоб з часом не стиралась і не дряпалась поверхня

п'єзоперетворювача, що може призвести до неточних або і невірних результатів контролю, днище приладу потрібно зробити з твердого металу, який швидко не стирається. Отже, дно п'єзоперетворювача і днище повинні знаходитись в одній площині.

2.2.3.1 Розрахунок похилого перетворювача

Призма забезпечує короткий шлях для корисного сигналу і досить довгий шлях для акустичних шумів.

Розрахуємо кути і розміри призми, що забезпечують відсутність завад (рис. 2.9).

Визначимо кут α , враховуючи закон заломлення ультразвукових хвиль згідно з [9]:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{\gamma \cdot C_{\text{лп}}}{C_{\text{лок}}}\right), \quad (2.62)$$

де γ – кут вводу ультразвукових коливань в об'єкт контролю ($\gamma = 67^\circ$);

$C_{\text{лп}}$ – швидкість поширення ультразвукових коливань в призмі (для полікарбонату $C_{\text{лп}} = 2670$ м/с); $C_{\text{лок}}$ – швидкість поширення ультразвукових коливань в об'єкті контролю (для вуглецевої сталі $C_{\text{лок}} = 5850$ м/с).

Підставивши наші значення отримаємо:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{\sin 67^\circ \cdot 2670}{5850}\right) = 25^\circ.$$

При проектуванні призми необхідно уникати великих завадних сигналів. Випромінюючий пучок приблизно вважаємо паралельним. Для того, щоб промінь від точки В п'єзопластини (дивись рисунок 2.9) не відбивався від двогранного кута А, потрібно вибрати достатньо велику стрілу перетворювача $n = AO$.

$$n > \frac{a}{\cos \alpha}, \quad (2.63)$$

де a – радіус п'єзопластини.

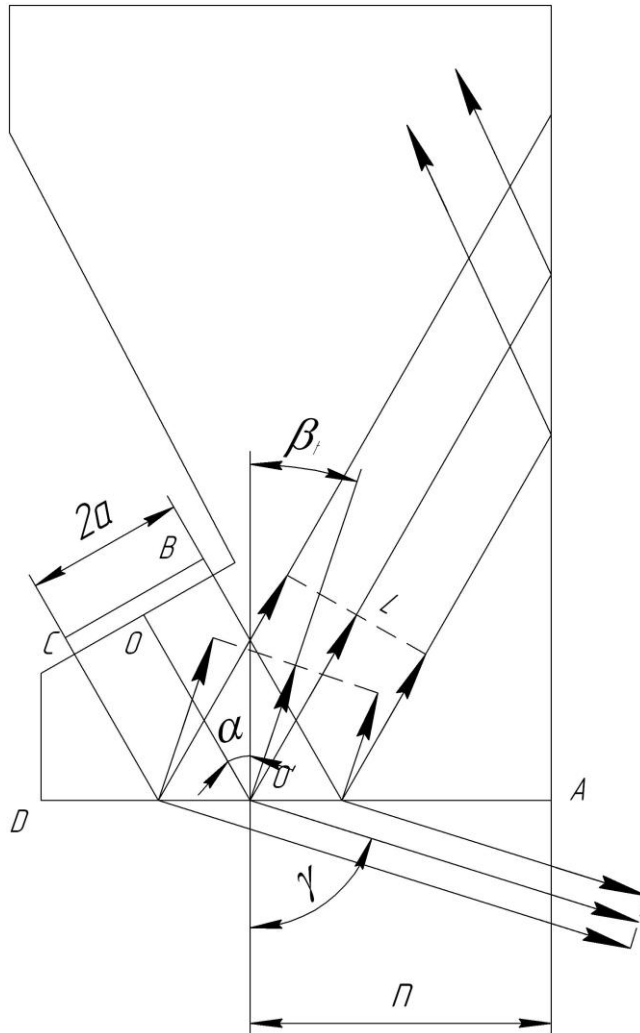


Рисунок 2.9 – Схема призми нахиленого п'єзоперетворювача

Для $a = 3$ мм і $\alpha = 25^\circ$ за формулою (2.63) знаходимо:

$$n > \frac{3}{\cos 25^\circ} = 3,31 \text{ мм.}$$

Отже, $n = 5$ мм.

Для того, щоб промінь з точки С п'єзопластини після відбиття від нижньої грані призми і трансформації в поперечну хвилю не потрапляв в точку В, потрібно вибрати достатньо великий шлях в призмі:

$$r_A = OO' > a \cdot (2 \cdot \text{ctg}(\alpha + \beta_t) + \text{tg} \alpha). \quad (2.64)$$

Визначаємо кут β_t відбиття поперечних хвиль в призмі:

$$\beta_t = \arcsin\left(\frac{C_m \cdot \sin \alpha}{C_{\text{in}}}\right), \quad (2.65)$$

де C_{in} – швидкість поширення поперечної хвилі в призмі ($C_{\text{in}} = 1120$ м/с).

Підставляючи у формулу (2.65), одержимо:

$$\beta_t = \arcsin\left(\frac{1120 \cdot \sin 25^\circ}{2670}\right) = 10^\circ.$$

Підставляючи числові значення у формулу (2.64), одержимо:

$$r_A = OO' > 3 \cdot (2 \cdot \text{ctg}(25^\circ + 10^\circ) + \text{tg} 25^\circ) = 9,98 \text{ мм}.$$

Вибираємо $r_A = 11$ мм.

Довжину $O'D$ знаходимо з умови:

$$O'D > r_A \cdot \sin \alpha + a \cdot \cos \alpha. \quad (2.66)$$

Отже,

$$O'D > 11 \cdot \sin 25^\circ + 3 \cdot \cos 25^\circ = 7,37 \text{ мм} \approx 8 \text{ мм}.$$

Розглянемо пластину з п'єзоматеріалу кварцу з електродами на поверхнях, тобто напрям електричного поля збігається з товщиною пластини.

Розраховуємо товщину п'єзопластини, яка має резонансні властивості і враховуючи, що п'єзоперетворювач працює на частоті $f = 5$ МГц, за формулою:

$$h_1 = \frac{C_{\text{лк}}}{2 \cdot f}, \quad (2.67)$$

де $C_{\text{лк}}$ – швидкість поширення повздовжніх хвиль у кварці ($C_{\text{лк}} = 5760$ м/с).

Отже,

$$h_1 = \frac{5760}{2 \cdot 5 \cdot 10^6} = 0,6 \text{ мм}.$$

Для розрахунку узгодження п'єзопластини із середовищем, куди випромінюється ультразвук використовуємо визначення акустичної добротності пластини за формулою:

$$Q_a = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{z_1}{z_0 + z_2}, \quad (2.68)$$

де z_1 – хвильовий опір кварцу ($z_1 = 15,3 \cdot 10^6$ Па·с/м); z_0, z_2 – хвильовий опір середовищ, що контактують із пластиною без проміжних шарів, тобто

демпфера з азбестового картону ($z_0 = 1,4 \cdot 10^6$ Па·с/м) та призми з полікарбонату ($z_2 = 3,14 \cdot 10^6$ Па·с/м).

Отже,

$$Q_a = \frac{3,14}{2} \cdot \frac{15,3 \cdot 10^6}{(1,4 + 3,14) \cdot 10^6} = 5,3.$$

Розраховуємо ємність п'єзопластини як плоского конденсатора за формулою:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot S}{h_1}, \quad (2.69)$$

де $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – діелектрична проникність вакууму; ε – діелектрична проникність кварцу ($\varepsilon = 4,5$); S – площа круглої п'єзопластини:

$$S = \pi \cdot a^2 = 3,14 \cdot (3 \cdot 10^{-3})^2 = 3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2.$$

Отже,

$$C = \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 4,5 \cdot 3 \cdot 10^{-5}}{1,2 \cdot 10^{-3}} = 166 \cdot 10^{-14} \text{ Ф}.$$

Визначаємо коефіцієнт електромеханічного зв'язку β , який визначає пружну та електричну енергію при перетворенні, за формулою:

$$\beta = \frac{e}{\sqrt{z_1 \cdot C_{lk} \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon}}, \quad (2.70)$$

де e – п'єзоелектрична стала, яка зв'язує електричну напругу генератора з механічним напруженням у п'єзоматеріалі (для кварцу $e = 0,175$ Кл/м²).

Отже,

$$\beta = \frac{0,175}{\sqrt{15,3 \cdot 10^6 \cdot 5760 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 4,5}} = 0,093.$$

Комплексний електричний опір п'єзоперетворювача потрібно знати для оптимального його узгодження з генератором і підсилювачем пристрою.

Схему ввімкнення п'єзоперетворювача, яка дуже часто зустрічається показано на рис. 2.10.

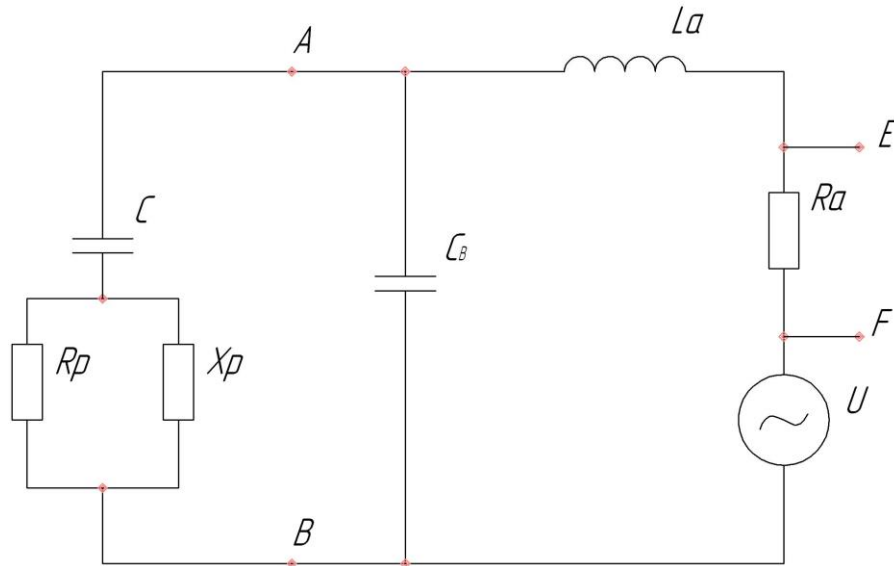


Рисунок 2.10 – Еквівалентна схема для розрахунку п'єзоперетворювача

На рис. 2.10 п'єзоперетворювач зображений у вигляді еквівалентного комплексного електричного опору, який складається з ємнісного опору п'єзопластини Z_c та п'єзоопору Z_p , зумовленого п'єзовластивостями:

$$Z_n = Z_c + Z_p. \quad (2.71)$$

Ємнісний опір визначається:

$$Z_c = \frac{1}{j\omega C}. \quad (2.72)$$

Комплексний п'єзоопір можна поділити на дві складові – активну та реактивну:

$$\frac{1}{Z_p} = \frac{1}{R_p} + \frac{1}{X_p}. \quad (2.73)$$

При навантаженні на проміжні середовища приблизне значення цих складових буде таким:

$$R_p = \frac{\beta^2}{\omega \cdot C \cdot k_1 \cdot h_1} \cdot \frac{4 \cdot z_1}{z_0 + z_2}; \quad (2.74)$$

$$X_p = \frac{4 \cdot \beta^2}{j\omega \cdot C} \cdot \frac{\text{tg}(0,5 \cdot k_1 \cdot h_1)}{0,5 \cdot k_1 \cdot h_1} \cdot \left(\frac{z_0 \cdot z_2}{z_1} - 4 \right)^{-1}, \quad (2.75)$$

де k_1 – хвильове число кварцу і дорівнює

$$k_1 = \frac{\omega_1}{C_{lk}}. \quad (2.76)$$

Отже,

$$R_p = \frac{\beta^2}{\pi^2 \cdot f \cdot C} \cdot \frac{2 \cdot z_1}{z_2 + z_0}. \quad (2.77)$$

Підставляючи у формулу (2.77) числові значення, одержимо:

$$R_p = \frac{(0,093)^2}{(3,14)^2 \cdot 2,5 \cdot 10^6 \cdot 166 \cdot 10^{-14}} \cdot \frac{2 \cdot 15,3 \cdot 10^6}{3,14 \cdot 10^6 + 1,4 \cdot 10^6} = 1425 \text{ Ом.}$$

Підставляючи числові значення у формулу (2.75), одержимо:

$$X_p = \frac{4 \cdot (0,093)^2}{j \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 2,5 \cdot 10^6 \cdot 166 \cdot 10^{-14}} \cdot \frac{\operatorname{tg} \left(0,5 \cdot 0,0012 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot \frac{2,5 \cdot 10^6}{5760} \right)}{0,5 \cdot 0,0012 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot \frac{2,5 \cdot 10^6}{5760}} \cdot \left(\frac{1,4 \cdot 10^6 \cdot 3,14 \cdot 10^6}{15,3 \cdot 10^6} - 4 \right)^{-1} = 0,043 \text{ Ом.}$$

В додатку А зроблена обробка даних, частоти f , діаметру п'єзопластини a і швидкості поширення поперечних ультразвукових коливань в сталі і в кварці, в результаті побудовано діаграму направленості за допомогою програми Diagram maker.

2.3 Розробка методики проведення контролю за допомогою спроектованого приладу

Для того, щоб можна було починати контроль даним дефектоскопом перш за все потрібно провести ряд дій до початку контролю. Найперше треба провести очищення і зачищення поверхні контролю від окалини, бруду та інших об'єктів, тобто зварного шва і ділянки біля нього.

Також потрібно провести настройку дефектоскопа на спеціальних зразках і настроїти необхідну чутливість контролю.

Після цього об'єкт контролю потрібно змастити контактною рідиною,

типу гліцерину, для того, щоб забезпечити хороший акустичний контакт між стінкою зварного шва і п'єзоперетворювачем. Якщо не забезпечити хорошого акустичного контакту, то контроль проводити не можна через те, що результати будуть не достовірними.

Після того, як ми забезпечимо хороший акустичний контакт, випромінювач потрібно плавно переміщувати так як це вказано на схемах проведення контролю зварних швів різних видів в розділі 2.1 даного дипломного проекту.

Спочатку сканування шва потрібно проводити в режимі „Пошук”, тобто коли ширина діаграми направленості трохи більша. Після того як буде виявлено приблизне розташування дефекту потрібно перейти в режим „Оцінка”, з меншою шириною діаграми направленості. В останньому режимі можна оцінити чи даний дефект знаходиться в допустимих межах чи ні. Така методика дозволяє спочатку виявити наявність дефекту, а потім уточнити його розміщення.

Якщо в контрольованому шві знаходиться дефект, то це повинно бути вказане в спеціальних документах і на схемі для того, щоб даний дефект можна було видалити і не збільшувався в розмірах, або дану деталь замінити.

Для того, щоб виявляти дефекти які орієнтуються під певними кутами випромінювач потрібно ставити під різними кутами то зварного шва (типовими такими дефектами є тріщини).

3 МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ПРИСТРОЮ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЮ ЗВАРНИХ ШВІВ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Метрологія – це вчення про вимірювання, методи та засоби, за допомогою яких досягається потрібна точність; це – наука з єдиними принципами, методами, засобами.

На сучасному етапі розрізняють теоретичну метрологію, яка розглядає загальні теоретичні проблеми вимірювання, історичну метрологію, законодавчу метрологію, прикладну метрологію, яка вирішує питання практичного застосування методів і засобів вимірювання.

Технічні вимірювання є складовою частиною прикладної метрології.

Метрологія – наукова основа контролю якості. Прикладні дисципліни цієї науки дозволяють нормувати кількісні характеристики якості продукції й процесів, виявляти ступінь точності й надійності результатів вимірювання, що необхідні для поелементного контролю якості продукції на всіх етапах її проектування, виготовлення і експлуатації.

3.1 Огляд метрологічних характеристик контролю

Основною задачею при проведенні неруйнівного контролю будь-яким методом є забезпечення точності та достовірності результатів контролю, тобто необхідно досягти того, щоб прогнозовані результати завжди “справджувалися”. Чим відповідальнішим, дорожчим є об’єкт контролю, тим вищими є вимоги до достовірності проведення діагностики.

Точність і достовірність неруйнівного контролю залежить від метрологічних характеристик технічних засобів контролю.

Нормування метрологічних характеристик підпорядковується нормуванню характеристик засобів вимірювання, їхніх похибок, яке здійснюється з розділенням похибки Δ засобу вимірювання на систематичну Δ_s

і випадкову Δ_B складові або без підрозділу [10].

Для систематичної складової Δ_S , нормують значення математичного сподівання $M(\Delta_S)$ і середнього квадратичного відхилення $\sigma|\Delta_S|$. Нормованими характеристиками випадкової складової Δ_B є: середнє квадратичне відхилення $\sigma(\Delta_B)$, нормалізована автокореляційна функція $r_\Delta(\tau)$ або функція спектральної щільності $S_\Delta(\omega)$, випадкової складової похибки.

Для похибки Δ (без підрозділу на Δ_S і Δ_B) засобів вимірювання нормовані характеристики ті самі, що і для похибки Δ_S .

Статичні характеристики засобів вимірювання відповідають статичному режиму застосування засобів вимірювання, при якому вимірювана величина не залежить від часу, а тривалість перетворення достатня для загасання перехідних процесів у вимірювальному колі.

Зв'язок між інформативним параметром x вхідного сигналу і інформативним параметром y вихідного сигналу виражається функцією перетворення

$$y=f(x). \quad (3.1)$$

Засобу вимірювання присвоюється номінальна функція перетворення

$$y_{sf} = f_{sf}(x), \quad (3.2)$$

що називається градуйованою характеристикою.

На основі залежностей (3.1) і (3.2) визначають коефіцієнти перетворення

$$K=y/x \text{ і } K_{sf} = y_{sf}/x, \quad (3.3)$$

причому $K_{sf}=\text{const}$ тільки тоді, коли залежність (3.2) лінійна і проходить через початок системи координат.

Похідна від функції перетворення

$$S=dy/dx=f'(x) \quad (3.4)$$

або в кінцевих приростах

$$S=\Delta y/\Delta x \quad (3.5)$$

називається чутливістю засобу вимірювання.

Номінальна чутливість

$$S_{sf}(x) = \Delta y_{sf} / \Delta x. \quad (3.6)$$

Розмірність чутливості визначається відношенням розмірностей вихідної і вхідної величин.

Поріг чутливості – найменше значення вхідної величини, яке викликає фіксовані приладом зміни вихідної величини.

Динамічними характеристиками називаються такі, що залежать від моменту часу вимірювання. Це проявляється, наприклад, в тому, що вимірювана фізична величина змінюється швидше, ніж реакція вимірювального засобу на цю зміну.

Як динамічні характеристики засобів вимірювання використовується перехідна функція та імпульсна перехідна функція.

Перехідна функція $h(t)$ – відгук (реакція) лінійної динамічної системи на вхідний вплив у вигляді одиничної функції $1(t)$. За перехідною функцією можна визначати динамічні параметри системи: час реакції t_z ; постійну часу T , яка характеризує інерційність системи; коефіцієнт перетворення K тощо.

Імпульсна перехідна функція $g(t)$ – відгук динамічної системи на вхідний вплив у вигляді дельта-функції $\delta(t)$.

Похибки вимірювань визначаються головним чином похибками засобів вимірювання, а також похибкою теорії методом вимірювання і суб'єктивною похибкою дослідника.

Розрізняють також грубі похибки і промахи.

Похибки вимірювань поділяються на систематичні і випадкові.

Систематична похибка – складова похибки вимірювання, яка при повторенні рівноточних вимірювань незмінного розміру залишається постійною або закономірно змінюється.

Числові значення систематичних похибок визначаються шляхом вивіряння засобів вимірювання і можуть вноситись як поправки у результати

вимірюван.

Випадкова похибка – це складова похибки вимірювання, яка виникає із невстановлених дослідником причин. при повторенні вимірювання змінюється випадково

Залежно від умов застосування засобів вимірювання їхні систематичні похибки підрозділяють на основні і додаткові.

Основною похибкою називається похибка засобів вимірювання в умовах, які встановлено нормативно-технічними документами як нормальні для даних засобів вимірювання. Ця похибка обумовлена головним чином факторами інструментальних похибок, що є наслідком недосконалості конструкції або принципу дії засобу вимірювання.

Додатковими похибками називають зміни похибки засобу вимірювання, викликані відхиленнями величин, які впливають, від нормальних значень.

Залежно від форми числового виразу похибки незалежно від виду (систематичні або випадкові) розрізняють: абсолютні та відносні – для вимірювання; абсолютні, відносні і приведені – для засобів вимірювання.

Абсолютна похибка Δx – це різниця між вимірюваною величиною $x_{\text{ном}}$ (показником приладу x_n) і дійсним значенням x вимірюваної величини, тобто для вимірювання

$$\Delta x = x_{\text{ном}} - x, \quad (3.7)$$

а для приладу

$$\Delta x = x_n - x. \quad (3.8)$$

Більш інформативною є відносна похибка (γ %), яка з урахуванням виразів (3.7) і (3.8) визначається як:

$$\delta x = (\Delta x / x) \cdot 100. \quad (3.9)$$

Зручно використовувати вираз:

$$\delta x = \Delta x / x_{\text{ном}} \quad \text{або} \quad \delta x = \Delta x / x_n, \quad (3.10)$$

тому що значення $x_{\text{ном}}$ або x_n відомі, а різниця між (3.10) та (3.9) є величиною вищого порядку малості.

Наведена похибка (γ %) виражається як відношення абсолютної похибки до нормувального значення x_n :

$$\gamma = (\Delta x / x_N) 100. \quad (3.11)$$

При цьому x_n вибирають рівним:

- більшій межі вимірювання, якщо нульове значення x є початком шкали або знаходиться поза діапазоном вимірювання;
- більшому з модулів меж вимірювання, якщо нульове значення знаходиться всередині діапазону вимірювання (для електровимірювальних приладів - сумі модулів меж вимірювання);
- модулю різниці меж вимірювання, якщо шкалу прийнято з умовним нулем (шкала в $^{\circ}\text{C}$);
- номінальному значенню для засобів вимірювання з номінальним значенням вимірювальної величини (частотомір з діапазоном вимірювання 45..55 Гц з $f_{\text{ном}} = 50$ Гц);
- всій довжині шкали або її частині, рівній діапазону вимірювання (при цьому абсолютну похибку виражають також в одиницях довжини).

Якщо виконати вивіряння засобу вимірювання, тобто визначити його основну похибку в ряді точок шкали, і побудувати залежність абсолютної похибки від показників приладу, то ця залежність може мати подвійний характер: всі значення похибки можуть опинитися в межах прямих 1, паралельних осі абсцис, або значення похибки закономірно змінюються в межах прямих 2.

В наведеному випадку похибка Δx приладу може бути представлена двочленним рівнянням:

$$\Delta x = |a_0| + |b_0 x|, \quad (3.12)$$

де a_0 – адитивна похибка (похибка нуля); $b_0 x$ – мультиплікативна похибка

(похибка чутливості).

Абсолютні адитивні похибки не залежать від значення вимірюваної величини x , а мультиплікативні – пропорційні значенню x .

Адитивна похибка, визначувана нестабільністю у часі (дрейфом) нуля, тертям в опорах, шумами, вібрацією та іншими явищами, є одним з показників якості приладу. Від похибки нуля залежить найменше значення величини, яке може бути виміряним приладами.

Джерела мультиплікативної похибки – вплив діючих величин на параметри елементів і вузлів засобів вимірювання.

3.2 Аналіз похибок при ультразвуковому контролі зварних швів

Точність визначення дефектів та їх розміщення ультразвуковим методом визначається такими основними складовими похибки як методичною, систематичною, інструментальною і випадковою.

Методична похибка. Характерною причиною виникнення методичної похибки при вимірюванні амплітуди відбитого акустичного імпульсу є те, що відбитий сигнал має поступово наростаючу, а потім спадаючу амплітуду. Тому може виникнути похибка при визначенні першого імпульсу пакету, через його недостатню амплітуду.

Також до методичної похибки відноситься похибка, яка виникає при трансформації амплітуди сигналу при контролі на великих або малих відстанях.

Для запобігання такого виду похибок необхідно збільшувати амплітуду імпульсів, які посилаються в шов, а також підвищувати чутливість вхідних каскадів.

Систематична похибка зумовлена використанням при дефектоскопії різноманітних контактних середовищ при контролі криволінійних і

необроблених поверхонь. Для зменшення систематичної похибки можна зменшувати ширину робочої області п'єзоперетворювача.

Також значний вплив має точність задання кута нахилу п'єзоелектричного перетворювача, який також буде мати великий вплив на точність визначення місця знаходження дефекту.

Інструментальна похибка визначається якістю виконання основних каскадів дефектоскопа, а саме частотним діапазоном підсилювача високої частоти, точністю задання ультразвукових коливань п'єзоперетворювача, точністю напруги живлення каскадів, якістю виконання реєструючих приладів.

Даний вид похибки на даний час найменше впливає на результати вимірювання, оскільки розвиток техніки дозволяє досить якісно проводити конструювання та виготовлення основних вузлів. Тому інструментальна похибка найчастіше не враховується. Виняток може становити система автоматичного сканування, яка переміщає шукач по контрольованій поверхні. Похибка переміщення може впливати на точність визначення координат дефекту.

Випадкова похибка може виникати в результаті суб'єктивної оцінки оператором результатів контролю. Вона може бути викликана нещільним приляганням перетворювача до контрольованої поверхні. Величина даного типу похибки може бути визначена перед контролем. Для виключення випадкової похибки необхідно проводити багатократне сканування об'єму контрольованого шва.

3.3 Розробка методики стандартизації параметрів розроблюваного приладу

Стандартизація проводиться для таких основних параметрів контролю: умовна чутливість, кута введення акустичної хвилі, точності роботи глибиноміра, роздільної здатності і мертвої зони.

Для стандартизації умовної чутливості необхідно мати один чи декілька відбивачів в еталонному зразку з матеріалу, для якого точно відомі його акустичні характеристики. Для дефектоскопу без атенюатора сукупність відбивачів повинна забезпечити зміну амплітуди луно-сигналів в широкому динамічному діапазоні, який перекриває відповідний діапазон, маючий місце при контролі зварних швів(30-50 дб). При цьому еталонний відбивач повинен мати кругову індикатрису розсіювання, яка б дозволяла оцінювати умовну чутливість дефектоскопа з шукачами, які мають різний кут призми. Найбільш цим умовам відповідають відбивачі у вигляді призми з боковими циліндричними отворами. Але однозначна залежність між діаметром отворів і амплітудою відбитого сигналу існує тільки для поздовжніх хвиль. Поздовжні хвилі при скануванні нахиленими шукачами буде поширюватися в зразку, якщо він виконаний з того ж матеріалу, що і призма шукача.

У відповідності з [11], при діаметрі циліндричного отвору $D > \alpha$, де α – довжина хвилі, відношення N (в децибелах) амплітуд луно-сигналів відбитих від циліндричних отворів діаметром D_i і D_{i+1} , розміщених в дальній зоні шукача на одній глибині, складе

$$N = 20(\lg \sqrt{D_{i+1}} - \lg \sqrt{D_i}) \quad (3.12)$$

Враховуючи імпульсний характер випромінювання, який згладжує нерівномірність поля в ближній зоні шукача можна отримати залежність N для ближньої зони (3.13) та для дальньої зони (3.14):

$$N_{б.з.} \approx 17.4\delta \frac{\Delta H}{\cos \beta}; \quad (3.13)$$

$$N_{д.з.} \approx 17.4\delta \frac{\Delta H}{\cos \beta} + 30 \left(\lg \left(z + \frac{H}{\cos \beta} + \frac{\Delta H}{\cos \beta} \right) - \lg \left(z + \frac{H}{\cos \beta} \right) \right), \quad (3.14)$$

де ΔH – різниця в глибині залягання відбивачів; H – глибина залягання ближнього відбивача; $H + \Delta H$ – те ж саме для дальнього відбивача; z – відстань від перетворювача до точки вводу променя; δ – коефіцієнт затухання ультразвуку.

Коефіцієнт затухання ультразвуку при кімнатній температурі в оргсклі в залежності від частоти змінюється майже за лінійним законом:

$$\delta \approx 0,035 + 0,012(f - a), \quad (3.15)$$

де $a = 1,8$ МГц.

Якщо в дефектоскопі є атенюатор, то для еталонування умовної чутливості можна застосовувати відбивач у вигляді отвору із сферичним дном, бокового циліндричного отвору чи напівциліндричної увігнутої поверхні.

Для визначення похибки глибиноміра доцільно використовувати спосіб вимірювання інтервалів часу між донними луно-сигналами, які виникають при прозвучуванні зразка з любого матеріалу з відомою швидкістю ультразвуку в ньому.

Часовий інтервал T_0 між зондуючим імпульсом і n -м донним відбиттям при номінальних значення довжини l_0 зразка і швидкості C_{l_0} поздовжньої хвилі складе

$$T_0 = n \frac{2l_0}{C_{l_0}} \quad (3.16)$$

На величину часового інтервалу може впливати точність виготовлення зразка, відхилення швидкості поздовжньої хвилі від номінального значення і зміна температури, яка призводить до лінійного розширення матеріалу зразка і зміні швидкості поширення ультразвуку

Обчислення абсолютної похибки часового інтервалу будемо здійснювати за допомогою диференціального методу. Даний метод полягає у визначенні часткових похідних похибок вимірюваних величин.

Запишемо формулу за якою будемо обчислювати абсолютні похибки кінетичної енергії тіла:

$$\Delta T_0 = \left(\frac{dT_0}{dl_0} \right) \cdot \Delta l_0 + \left(\frac{dT_0}{dC_{l_0}} \right) \cdot \Delta C_{l_0}. \quad (3.17)$$

Отже, продиференціювавши отримаємо

$$\Delta T_0 = \frac{2 \cdot n}{C_{l_0}} \cdot \Delta l_0 - \frac{n \cdot l_0}{C_{l_0}^2}. \quad (3.18)$$

Підставивши наші значення отримаємо

$$\Delta T_0 = \frac{2 \cdot 1}{5850} \cdot 0,1 - \frac{1 \cdot 50}{5850^2} = 32,6 \cdot 10^{-5} \text{ c}.$$

Тепер визначимо відносну похибку за формулою

$$\delta T = \frac{\Delta T}{T} \cdot 100\%. \quad (3.19)$$

Отримаємо

$$\delta T = \frac{32,6 \cdot 10^{-5}}{17,1 \cdot 10^{-3}} \cdot 100\% = 1,9\%$$

Еталонування кута вводу променя. Для забезпечення необхідної достовірності контролю кут α введення променя повинен бути встановлений з точністю $\pm 2^\circ$.

Кут введення може бути вимірний по одному із наступних способів. Перший спосіб вимагає спочатку визначення положення центру випромінювання шукача по напівциліндричному зразку, а потім – вимірювання кута вводу променя по зразку з одним циліндричним відбивачем. Зразок, для визначення центру випромінювання може бути виготовлений з любого матеріалу, а зразок для визначення кута α – аналогічний по акустичним властивостям об'єкту контролю.

Кут знаходять за формулою (3.17):

$$\alpha_1 = \text{arctg} \frac{L_0}{H} \quad (3.20)$$

Визначимо абсолютну похибку кута введення ультразвуку в об'єкт контролю диференціальним методом

$$\Delta \alpha = \left(\frac{d\alpha}{dL} \right) \cdot \Delta L + \left(\frac{d\alpha}{dH} \right) \cdot \Delta H. \quad (3.21)$$

Продиференціювавши отримаємо

$$\Delta \alpha = \frac{1}{H} \cdot \frac{1}{1 + \frac{L^2}{H^2}} \cdot \Delta L - \frac{L}{H^2 \cdot \left(1 + \frac{L^2}{H^2} \right)} \cdot \Delta H. \quad (3.22)$$

Звідси отримаємо

$$\Delta\alpha = \frac{1}{20} \cdot \frac{1}{1 + \frac{51^2}{20^2}} \cdot 0,5 - \frac{51}{20^2 \cdot \left(1 + \frac{51^2}{20^2}\right)} \cdot 0,5 = 5,2 \cdot 10^{-3}.$$

Визначимо відносну похибку кута введення ультразвуку

$$\delta\alpha = \frac{\Delta\alpha}{\alpha} \cdot 100\%. \quad (3.23)$$

Підставивши числові значення отримаємо

$$\delta\alpha = \frac{5,2 \cdot 10^{-3}}{67} \cdot 100\% \approx 0,1\%.$$

Для визначення кута α другим способом вимірюють відстані L_1 і L_2 від центрів двох отворів в зразку до деякої умовної точки на перетворювачі. Знаючи величини L_1 і L_2 розраховують значення кута α і стріли шукача n по системі (3.24):

$$\begin{cases} n = \frac{H_1 L_2 - H_2 L_1}{H_2 - H_1} \\ \alpha_1 = \frac{\arctg\left(\frac{L_1 - n}{H_1}\right) + \arctg\left(\frac{L_2 - n}{H_2}\right)}{2} \end{cases} \quad (3.24)$$

Для вимірювання мертвої зони необхідно в зразку з матеріалу, аналогічного по акустичних характеристиках контролюваному, виконати на різній глибині циліндричні відбивачі діаметром 2 мм. Якщо необхідно тільки відповідність мертвої зони дефектоскопа з шукачами по заданій величині, то досить виконати в зразку по одному отвору на заданій глибині для кожного шукача. Очевидно, що такі отвори можуть бути виготовлені в еталоні, який призначений для вимірювання кута вводу променя.

Роздільна здатність в напрямку прозвучування може бути виміряна, по виявленню відбивачів, розміщених один за другим таким чином, що ехо-сигнали від них зміщені в часі на відому величину. Для перевірки роздільної здатності досить мати два подібних відбивачі. Відбивачі для вимірювання і перевірки роздільної здатності можуть бути виконані в будь-якому матеріалі з відомою швидкістю поширення ультразвуку.

Похибка точності задання ультразвукових коливань настільки мала, що нею можна знехтувати. Оскільки при зміні температури на 1 °С частота змінюється приблизно на 1 Гц, а це складає похибку приблизно 10^{-5} %.

Похибка точності задання напруги живлення каскадів також є незначною, але більшою ніж від точності задання ультразвукових коливань тому можливо прийняти її рівною 0,1 %.

Похибка зумовлена суб'єктивною оцінкою оператора може бути взагалі нульовою при проведенні багаторазових вимірювань (хоча б трьох), тому цю похибку ми також приймаємо рівною 0,1 %.

Отже, виходячи з вище зроблених розрахунків і висновків можемо вирахувати сумарну похибку ультразвукового дефектоскопа додавши всі похибки.

$$\delta_{\text{сум}} = 1,9 + 0,1 + 0,1 + 0,1 = 2,2\%.$$

ВИСНОВКИ

В даній магістерській роботі було зроблено аналіз методів для контролю зварних швів будівельних конструкцій.

Було зроблено вибір методу, а саме ультразвукового і поставлена задача на магістерську роботу.

В другому розділі було вибрано оптимальну частоту для контролю 5 МГц, проведено теоретичне обґрунтування ультразвукового контролю будівельних конструкцій, в якому вказані схеми проведення контролю з різними зварними швами.

Також в другому розділі даного дипломного проекту були здійснені розробки функціональної і електричної принципової схем. Здійснено розрахунок одного із вузлів приладу, а саме підсилювача відбитих сигналів і розробка друкованої плати цього підсилювача. Була розроблена конструкція компактного ультразвукового дефектоскопа для контролю зварних швів будівельних конструкцій виконано його складальне креслення на форматі А1. Ще в цьому розділі розроблено методику проведення контролю за допомогою даного дефектоскопу.

В третьому розділі зроблено огляд метрологічних характеристик контролю, аналіз похибок при ультразвуковому контролі зварних швів і розробку методики стандартизації параметрів розроблюваного приладу. Також в цьому розділі розраховано сумарну похибку проведення контролю.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Білокур І.П., Коваленко В.А. Дефектоскопія матеріалів та виробів. - Київ: Техніка, 1989. – 192 с
2. О.Карпаш, М.Карпаш, П. Райтер, Ф.Яворський, І Рибіцький, І. Ващищак, Є.Доценко Технічна діагностика обладнання та конструкцій. Навч.пос. Івано-Франківськ,2020.-413с.:іл.
3. Білокур І. П. Акустичний контроль.– К.: Либідь, 1999.– 244с
4. Сусліков Л.М., Студеняк І.П. Неруйнівні методи контролю: Навчальний посібник. – Ужгород: Видавництво УжНУ, 2016. - 192 с.
5. ДСТУ EN ISO 17640:2014 Неруйнівний контроль зварних швів. Ультразвуковий контроль. Способи, рівні контролю і оцінювання.
6. Білокур І.П. Елементи дефектології при вивченні неруйнівного контролю.– К.: НМК ВО, 1980.–252 с.
7. Зайцева Н. Н. Неруйнівний контроль зварних з'єднань .– К.: Вища школа, 1983.– 210с.
8. Електроніка та мікросхемотехніка: підручник / О.М. Воробйова, І.П. Панфілов, М.П. Савицька, Ю.В. Флейта. – Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2015. – 298 с.
9. Білокур І.П. Основи дефектоскопії. /І.П. Білокур — К.:Азимут-Україна, 2004.—496 с.
10. Кісіль І.С. Метрологія, точність і надійність засобів вимірювання: Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів./ І.С. Кісіль — Івано-Франківськ: Видавництво “Факел”. 2002. – 400 с.
11. ДСТУ EN ISO 10863:2014 Неруйнівний контроль зварних швів. Ультразвуковий контроль. Застосування дифракційно-часового методу (TOFD)
12. 1. Фізичні методи вивчення властивостей матеріалів / Посвятенко Е.К., Будяк Р.В., Мельник О.В., Нікітін В.Г. – К. : НТУ, 2019. – 184 с. 2. Холявко В.В. Фізичні властивості та методи дослідження матеріалів :

навчальний посібник для студентів галузі знань 13 – Механічна інженерія спеціальності

13. Найденко В.І. Фізика та методи дослідження сировини та матеріалів : навчальний посібник / К. : КНТУ, 2004. – 509 с. 7 6. Методи дослідження фізико-механічних властивостей матеріалів / Веселовська Н.Р., Посвятенко Е.К., Солоня О.В., Будяк Р.В. – Вінниця : ВНТУ, 2018. – 150 с. 2

14. Приборы акустические [електронний ресурс] — Режим доступу: <http://zapadpribor.com/index.php?page=product&id=5819>.

15. Приборы акустические [електронний ресурс] — Режим доступу: <http://www.ppm-systems.ru/catalognew/?pid=22fda576&id=6c1f80ec>.

ДОДАТКИ

Додаток А

Розрахунок діаграми направленості п'єзоперетворювача

$$a := 3 \quad f := 5 \quad C_z := 2.67 \quad C := 5.85 \quad \beta := 25 \cdot \frac{\pi}{180}$$

$$\alpha := \operatorname{asin}\left(\frac{C \cdot \sin(\beta)}{C_z}\right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad \alpha = 67.814$$

$$ka' := 2 \cdot \pi f \cdot a \cdot \frac{\cos\left(\alpha \cdot \frac{\pi}{180}\right)}{C \cdot \cos(\beta)} \quad ka' = 6.713$$

$$\theta := 0, 0.01.. 8$$

$$F(\theta) := \left| \frac{2J_1(ka' \cdot \sin(\theta))}{ka' \cdot \sin(\theta)} \right|$$

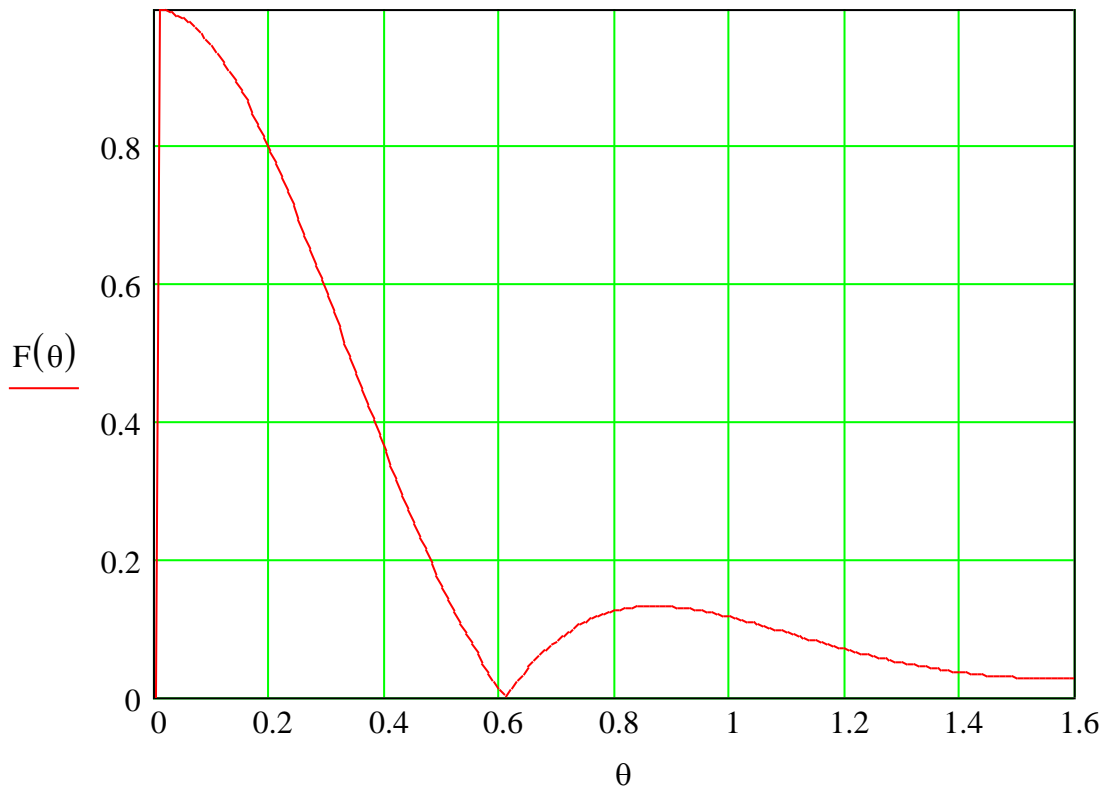


Рисунок А.1 – Діаграма направленості п'єзоперетворювача в декартових координатах

Продовження додатку А

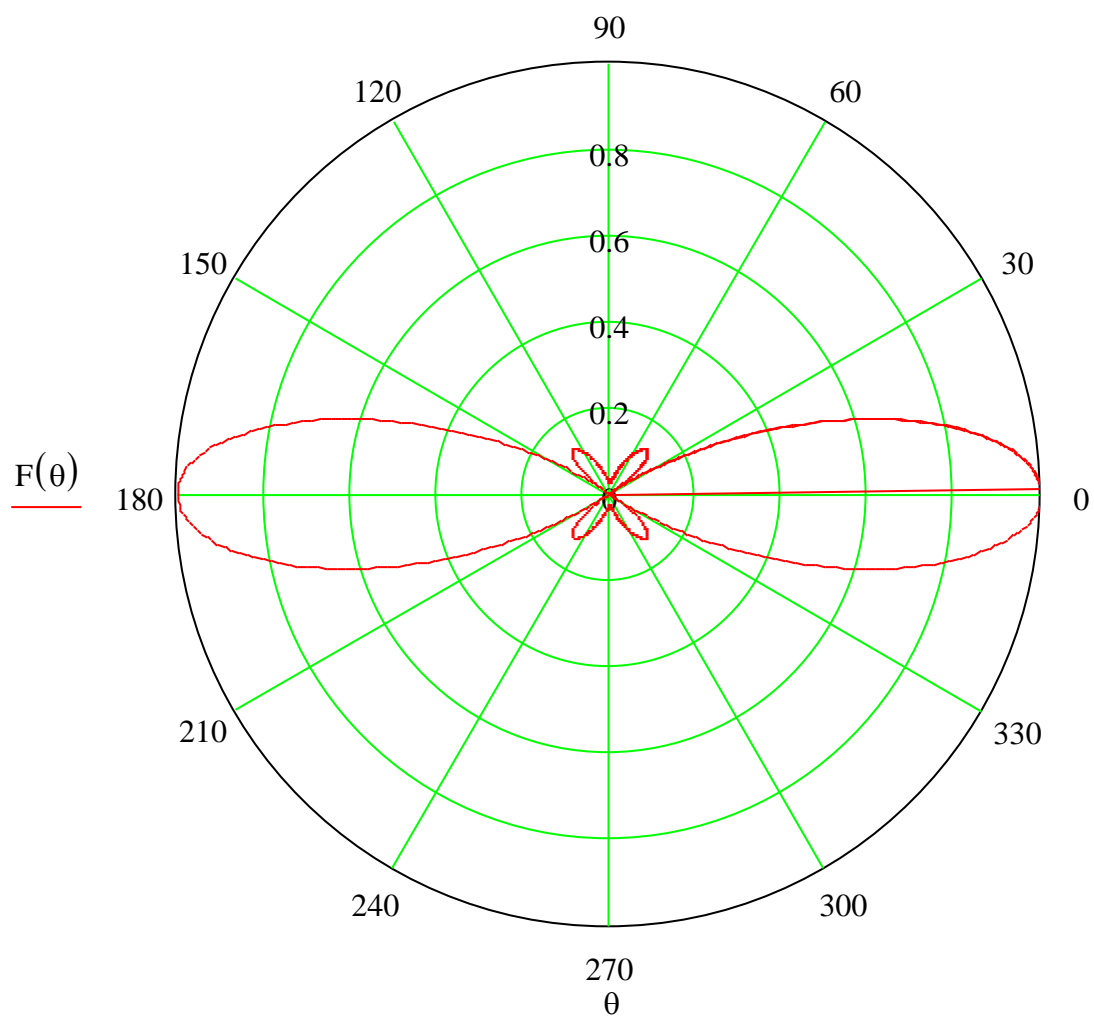


Рисунок А.2 – Діаграма направленості п'єзоперетворювача в полярних координатах

Формат	Зона	Лист	Позначення	Назва	Кіл	Примітка
				<u>Документація</u>		
A1			MP.MMt-16.01.00.000 СК	Складальне креслення		
				<u>Складальні одиниці</u>		
		1	MP.MMt-16.01.01.000	Блок індикації	1	
		2	MP.MMt-16.01.02.000	Блок підсилення	1	
		3	MP.MMt-16.01.03.000	Блок сигналізації	1	
		4	MP.MMt-16.01.04.000	Жгут	4	
		5	MP.MMt-16.01.05.000	Кришка	1	
		6	MP.MMt-16.01.06.000	Панель	1	
		7	MP.MMt-16.01.07.000	П'єзоперетворювач	1	
		8	MP.MMt-16.01.08.000	Стінка	1	
		9	MP.MMt-16.01.09.000	Стінка	1	
				<u>Деталі</u>		
		10	MP.MMt-16.01.00.001	Втулка	4	
		11	MP.MMt-16.01.00.002	Втулка	4	
		12	MP.MMt-16.01.00.003	Втулка	4	
		13	MP.MMt-16.01.00.004	Гайка	4	
		14	MP.MMt-16.01.00.005	Днище	1	
		15	MP.MMt-16.01.00.006	Кришка	1	
		16	MP.MMt-16.01.00.007	Кришка відсіку батареї	1	
		17	MP.MMt-16.01.00.008	Кронштейн	2	
		18	MP.MMt-16.01.00.009	Панель	1	
		19	MP.MMt-16.01.00.010	Прокладка	1	
			MP.MMt-16.01.00.000			
Змін.	Арх.	№ докумен.	Підпис	Дата		
Розробив		Кульчак.			Літера	Арх.
Перевірив		Боднар Р. Т.			Н	1
Н. контр.					ІФНТУНГ	
Затвердив		Середюк.				
Дефектоскоп ультразвуковий						

Поз. познач.	Найменування	Кіл.	Примітка
BF1	Телефон	1	
	Конденсатори KM2 ОЖО 460043 ТУ		
	Конденсатори K10-17 ОЖО.460.172 ТУ		
	Конденсатори K50-16 ОЖО.468.111 ТУ		
C1	KM2-60B-4700пФ±20%	1	
C2	KM2-60B-3300пФ±20%	1	
C3, C4	KM2-60B-1200пФ±20%	2	
C5	K10-17-25B-30мкФ±5%	1	
C6	K10-17-25B-3мкФ±5%	1	
C7, C8	K50-16-25B-10мкФ±5%	2	
C9,	KM2-60B-3300пФ±20%	2	
C11	K10-17-25B-1200пФ±5%	1	
C12	K50-16-25B-20мкФ±5%	1	
C13	KM2-60B-1500пФ±20%	1	
C14	K10-17-25B-0,068мкФ±5%	1	
C15	KM2-60B-1200пФ±20%	1	
C16,	K50-16-25B-20мкФ±5%	2	
C18	K10-17-25B-0,068мкФ±5%	1	
C19	KM2-60B-3300пФ±20%	1	
C20	K10-17-25B-750пФ±5%	1	
C21	K10-17-25B-0,032мкФ±5%	1	
C22	KM2-60B-15мкФ±20%	1	
C23	K10-17-25B-0,047мкФ±5%	1	
C24	K10-17-25B-1мкФ±5%	1	
C25	K10-17-25B-750пФ±5%	1	
C26	K10-17-25B-0,032мкФ±5%	1	
C27	KM2-60B-1200пФ±20%	1	
MP.MMm-16.00.00.000 ПЕЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис Да-
Розроб.	Квльчак		
Перевір.	Боднар Р. Т.		
Реценз.			
Н.			
Затверд.	Середюк		
Дефектоскоп ультразвуковий		Літ.	Арк.
Перелік елементів		1	4
		ІФНТУНГ	

Поз. познач.	Найменування	Кіл.	Примітка
C27	КМ2-60В-1500 пФ±20%	1	
C28	К10-17-25В-1200 пФ±5%	1	
C29	КМ2-60В-75 мкФ±20%	1	
C30	К10-17-25В-750 пФ±5%	1	
C31	К10-17-25В-1 мкФ±5%	1	
C32	КМ2-60В-1200 пФ±20%	1	
C33	КМ2-60В-1500 пФ±20%	1	
C34	КМ2-60В-3 мкФ±20%	1	
	<i>Мікросхеми</i>		
DA1	К217НТ1 6КО 348.107 ТУ	1	
DD1...DD5	1861АГ1 6КО 348.406 ТУ	5	
DD6	1561АГ3 6КО 348.038 ТУ	1	
DD7, DD8	1861АГ1 6КО 348.406 ТУ	2	
DD9	564АГ1 6КО 348.231 ТУ	1	
GB1	Батарея „Крона” ОСТ 16.0.529.013-74	1	
HG1...HG3	Індикатори ЦИЖ6 ЩАЗ 347.063 ТУ	3	
	<i>Резистори МЛТ ОЖО.468.180 ТУ</i>		
	<i>Резистори РП1-48 ОЖО 468.157 ТУ</i>		
R1, R2	МЛТ-0,125-6,8 кОм±5%	1	
R3, R4	МЛТ-0,25-100 кОм±5%	2	
R5	МЛТ-0,125-9,1 кОм±5%	1	
R6, R7	МЛТ-0,25-1,3 кОм±5%	2	
R8	МЛТ-0,5-100 кОм±5%	1	
R9	МЛТ-0,25-20 кОм±5%	1	
R10	РП1-48-330 Ом±5%	1	
R11	МЛТ-0,125-2 кОм±5%	1	
R12	МЛТ-0,125-9,1 кОм±5%	1	
R13,	МЛТ-0,125-1,3 кОм±5%	2	
			Арк.
			2
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис Да-
			MP.MMm-16.00.00.000 ПЕЗ

Поз. познач	Найменування	Кіл.	Примітка
R15	МЛТ-0,125-100 Ом±5%	1	
R16	МЛТ-0,125-1 кОм±5%	1	
R17	МЛТ-0,125-150 Ом±5%	1	
R18,	РП1-48-330 Ом	1	
R19	РП1-48-680 Ом	1	
R20	МЛТ-0,125-1,3 кОм±5%	1	
R21	МЛТ-0,125-9,1 кОм±5%	1	
R22	МЛТ-0,5-220 кОм±5%	1	
R23	МЛТ-0,125-6,8 кОм±5%	1	
R24	МЛТ-0,125-1,3 кОм±5%	1	
R25	МЛТ-0,125-1 кОм±5%	1	
R26	МЛТ-0,125-820 Ом±5%	1	
R27	МЛТ-0,125-750 Ом±5%	1	
R28	МЛТ-0,25-20 кОм±5%	1	
R29	МЛТ-0,125-24 кОм±5%	1	
R30	МЛТ-0,125-6,8 кОм±5%	1	
R31	МЛТ-0,125-2,4 кОм±5%	1	
R32	МЛТ-0,125-15 Ом±5%	1	
R33	МЛТ-0,125-1,2 кОм±5%	1	
R34	МЛТ-0,125-820 Ом±5%	1	
R35	МЛТ-0,125-24 кОм±5%	1	
R36	МЛТ-0,125-6,8 кОм±5%	1	
R37	МЛТ-0,125-2,4 кОм±5%	1	
R38	МЛТ-0,125-15 Ом±5%	1	
R39	МЛТ-0,125-1,2 кОм±5%	1	
R40	МЛТ-0,125-8,2 кОм±5%	1	
R41	МЛТ-0,125-24 кОм±5%	1	
R42	МЛТ-0,125-6,8 кОм±5%	1	
R43,	МЛТ-0,125-1,3 кОм±5%	2	
R45	МЛТ-0,125-2,4 кОм±5%	1	
R46	МЛТ-0,125-2 кОм±5%	1	
R47	РП1-48-330 Ом	1	
Змн.	Док.	№ доквм.	Підпис Да-
MP.MMm-16.00.00.000 ПЕЗ			Док. 3

