

**Національний технічний університет України
„Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”
Приладобудівний факультет
Кафедра приладів та систем неруйнівного контролю**

До захисту допущено:
Завідувач кафедри
_____ Протасов А.Г
«__» _____ 2021 р.

Дипломний проєкт
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою «Комп’ютерно-інтегровані системи
та технології неруйнівного контролю та діагностики»
спеціальності 151 «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології»
на тему:
«Ультразвуковий вимірник швидкості повздовжніх хвиль»

Виконав:
студент IV курсу, групи ПК-71
Йіргу Габріел Деженович _____

Керівник:
доктор філософії
Момот Андрій Сергійович _____

Рецензент:
Доцент, д.т.н., доцент,
Шевченко Костянтин Леонідович _____

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.
Студент _____

Київ - 2021 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

| № з/п | Формат | Позначення | Найменування | Кількість листів | Примітка |
|-------|--------|--------------------|--------------------------------|------------------|----------|
| 1 | A4 | | Завдання на дипломний проєкт | 2 | |
| 2 | A4 | ДП 7104. 00.000 ПЗ | Пояснювальна записка | 34 | |
| 3 | A4 | ДП 7104. 01.000 E1 | Схема електрична структурна | | |
| 4 | A3 | ДП 7104. 01.000 E2 | Схема електрична функціональна | 1 | |
| 5 | A1 | ДП 7104. 02.000 E3 | Схема електрична принципова | 1 | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |

| | | | | ДП 7104 00.000.00 | | |
|-----------|---------------|-------|------|---------------------------------|--|--------|
| | ПІБ | Підп. | Дата | | | |
| Розробн. | Йіргу Г.Д. | | | Відомість дипломного проєкту | Лист | Листів |
| Керівн. | Момот А.С. | | | | 1 | 1 |
| Консульт. | | | | | КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. ПСНК Гр. ПК-71 | |
| Н/контр. | | | | | | |
| Зав.каф. | Протасов А.Г. | | | | | |

**Національний технічний університет України
„Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”
Приладобудівний факультет
Кафедра приладів та систем неруйнівного контролю**

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 151 «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології»

Освітньо-професійна програма «Комп’ютерно-інтегровані системи та технології неруйнівного контролю і діагностики»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Протасов А.Г.

«__» _____ 2021 р.

**ЗАВДАННЯ
на дипломний проєкт студенту
Йіргу Габріел Деженович**

1. Тема проєкту (роботи): Ультразвуковий вимірювач швидкості повздовжніх хвиль
2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 11.06.2021
3. Вихідні дані до проєкту: об’єкт контролю – сталі, робоча частота 5МГц, діапазон вимірюваних товщин від 20 мм до 50 мм, похибка менше 2%.
4. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов’язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): структурна і функціональна схеми, схема електрична принципова, складальний кресленик
5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо)
6. Консультанти розділів роботи^{1*}

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

7. Дата видачі завдання _____

Календарний план

| № з/п | Назва етапів виконання дипломної роботи | Термін виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|---|--------------------------------|----------|
| 1 | Формулювання завдання проекту | 15.04.2021 | |
| 2 | Проведення аналітичного огляду | 10.05.2021 | |
| 3 | Розробка моделі пристрою | 20.05.2021 | |
| 4 | Створення робочого пристрою | 05.06.2021 | |
| 5 | Оформлення пояснювальної записки | 18.06.2021 | |
| 6 | Розробка плакатів | 25.06.2021 | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

Студент

Габріел ЙІРГУ

Керівник

Андрій МОМОТ

Анотація

Сьогодні неможливо уявити машинобудівне виробництво без використання сталі. Завдяки хорошим механічними властивостями з сталі виготовляють відповідальні деталі. Тому на сьогодні неруйнівний контроль сталі є актуальним завданням.

Дипломний проект складається з чотирьох розділів. У першому розділі дипломного проекту було проведено аналітичний огляд, в якому розглянуто об'єкт контролю. Аналіз методів неруйнівного контролю сталі, їх переваги та недоліки. У другому розділі було розраховано прямий суміщений п'єзоелектричний перетворювач, акустичний і електроакустичний тракт. Розроблено структурну схему, а на її основі функціональну. Розраховані і узгодженні всі вузли функціональної схеми.

В третьому розділі було проведено огляд технології виготовлення прямого суміщеного п'єзоперетворювача. А також створення його 3D моделі в програмному середовищі SolidWorks.

В четвертому розділі були проведені розрахунки похибок. На основі розрахунків і проектувань електрична принципова схема.

Дипломний проект складається із пояснювальної записки обсягом 65 сторінок, включає 13 ілюстрацій, 1 таблицю, 16 креслеників та 60 формул.

Ключові слова: ультразвуковий контроль, повздовжні хвилі, швидкість ультразвуку, неруйнівний контроль, ультразвукова товщинометрія

Summary

Today it is impossible to imagine machine-building production without the use of steel. Due to the good mechanical properties of steel, responsible parts are made. Therefore, today non-destructive testing of steel is an urgent task.

The diploma project consists of four sections. In the first section of the diploma project, an analytical review was conducted, in which the object of control was considered. Analysis of methods of non-destructive testing of steel, their advantages and disadvantages. In the second section, a direct combined piezoelectric transducer, acoustic and electroacoustic path were calculated. The structural scheme, and on its basis functional is developed. All nodes of the functional scheme are calculated and coordinated.

The third section reviews the technology of making a direct combined piezoelectric transducer. And also creation of its 3D model in the SolidWorks software environment.

In the fourth section, error calculations were performed. Based on calculations and designs electrical circuit diagram.

The diploma project consists of an explanatory note of 65 pages, includes 13 illustrations, 1 table, 16 drawings and 60 formulas.

Keywords: ultrasonic control, longitudinal waves, ultrasonic speed, non-destructive testing, ultrasonic thickness measurement

Пояснювальна записка
до дипломного проєкту на тему:
«Ультразвуковий вимірювач швидкості
повздожніх хвиль»

Київ – 2021 року

ЗМІСТ

| | |
|---|-----------|
| ВСТУП | 8 |
| РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД | 9 |
| 1.1 Опис та фізико-технічні характеристики сталей | 9 |
| 1.2 Основні дефекти виробів зі сталі та причини їх виникнення | 13 |
| 1.3 Методи контролю виробів зі сталі | 17 |
| 1.3.1 Магнітні методи неруйнівного контролю | 18 |
| 1.3.2 Радіаційні методи НК | 19 |
| 1.3.3 Акустичні методи неруйнівного контролю | 21 |
| 1.4 Актуальність визначення швидкості ультразвуку | 22 |
| 1.5 Вибір методу визначення швидкості ультразвуку в сталях | 25 |
| 1.6 Огляд існуючих приладів | 30 |
| 1.7 Вибір структурної схеми | 33 |
| РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА | 36 |
| 2.1 Розрахунок п'єзоперетворювача | 36 |
| 2.2 Розрахунок акустичного тракту | 37 |
| 2.3 Розрахунок електроакустичного тракту | 39 |
| 2.4 Розробка та розрахунок функціональної схеми приладу | 40 |
| 2.4.1 Розрахунок генератора зондуючих імпульсів | 42 |
| 2.4.2 Розрахунок схеми захисту | 44 |
| 2.4.3 Розрахунок операційного підсилювача | 45 |
| 2.4.4 Розрахунок смугового фільтру | 46 |
| 2.4.5 Вибір автоматичного регулювання підсилення | 48 |
| 2.4.6 Розрахунок та вибір АЦП | 49 |

| | | | | | | | | | |
|------------------|-------------|-------------------|---------------|-------------|--|-------------------|-------------|---------------|--|
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| <i>Змн.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> | | <i>Літ.</i> | <i>Арк.</i> | <i>Аркуші</i> | |
| <i>Розроб.</i> | | <i>Йіргу Г.Д.</i> | | | | | | | |
| <i>Перевір.</i> | | <i>Момот А.С.</i> | | | | | | | |
| <i>Н. Контр.</i> | | | | | | | | | |
| <i>Затверд.</i> | | <i>Момот А.С.</i> | | | | | | | |
| | | | | | | ПБФ, ПК-71 | | | |

| | |
|--|-----------|
| 2.4.7 Розрахунок та вибір пам'яті | 51 |
| 2.4.8 Вибір мікроконтролера | 53 |
| 2.4.9 Вибір дисплея | 54 |
| 2.4.10 Вибір кнопок | 55 |
| РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ПЕРЕТВОРЮВАЧА | 56 |
| 3.1 Технологія виготовлення перетворювача | 56 |
| 3.2 Розробка моделі перетворювача | 60 |
| РОЗДІЛ 4. РОЗРАХУНОК ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ | 61 |
| 4.1 Похибка формування вимірювального інтервалу часу | 61 |
| 4.2 Похибка проходження через контактну рідину | 61 |
| 4.3 Похибка квантування АЦП | 62 |
| 4.4 Похибка підсилювача | 62 |
| 4.5 Загальна похибка | 62 |
| ВИСНОВОК | 63 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ | 64 |

| | | | | | | |
|------|-------|-----------|--------|------|--|-------|
| | | | | | | Арк.А |
| | | | | | | |
| Змн. | Арк.А | № докум.№ | Підпис | Дата | | |

ВСТУП

Сьогодні важко уявити керований людиною процес, що може існувати без виконання операцій вимірювання та контролю фізичних параметрів. Ми постійно контролюємо температуру, напругу в мережі, якість повітря і багато інших параметрів. Особлива увага приділяється неруйнівному контролю якості матеріалів, окремих деталей, конструкцій, процесів роботи механізмів та систем в машинобудуванні, транспорті, енергетиці, хімічній промисловості, практично в будь-якій галузі діяльності людини. Одним із найефективніших та найбільш універсальних методів НК являються акустичні методи НК.

Вони застосовуються для вирішення широкого кола задач в багатьох галузях промисловості, медицині, а також в наукових дослідженнях. За допомогою акустичних методів НК в заготовках і виробках, виготовлених практично із будь-яких матеріалів, можна виявляти поверхневі та внутрішні дефекти, що являють собою порушення суцільності, неоднорідності структури, зони враження корозією, дефекти склейки, пайки, зварювання та ін.. Ці методи також дозволяють контролювати геометричні розміри, наприклад, у випадку, коли доступ до ОК є тільки з однієї сторони можна виміряти товщину, а також фізико-механічні властивості матеріалів не порушуючи їх структуру. Акустичні методи успішно застосовують для вивчення початкової стадії руйнування зразків та виробів при випробуваннях на втому.

При контролі фізичних властивостей матеріалів, їх якості, неруйнівного контролю залишкового ресурсу різних виробів, втоми та напруженості досліджуваних конструкцій одним з важливих інформативних параметрів є швидкість розповсюдження ультразвукової хвилі.

| | | | | | | |
|------|-------|-----------|--------|------|--|-------|
| | | | | | | Арк.А |
| Змн. | Арк.А | № докум.№ | Підпис | Дата | | 8 |

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1 Опис та фізико-технічні характеристики сталей

Ультразвук - це механічна хвиля, частота коливань якої перевищує 20 кГц, що перевищує частоту коливань, яку може сприймати людське вухо. Люди зазвичай сприймають частоти в діапазоні 16-20 кГц, їх називають звуками.

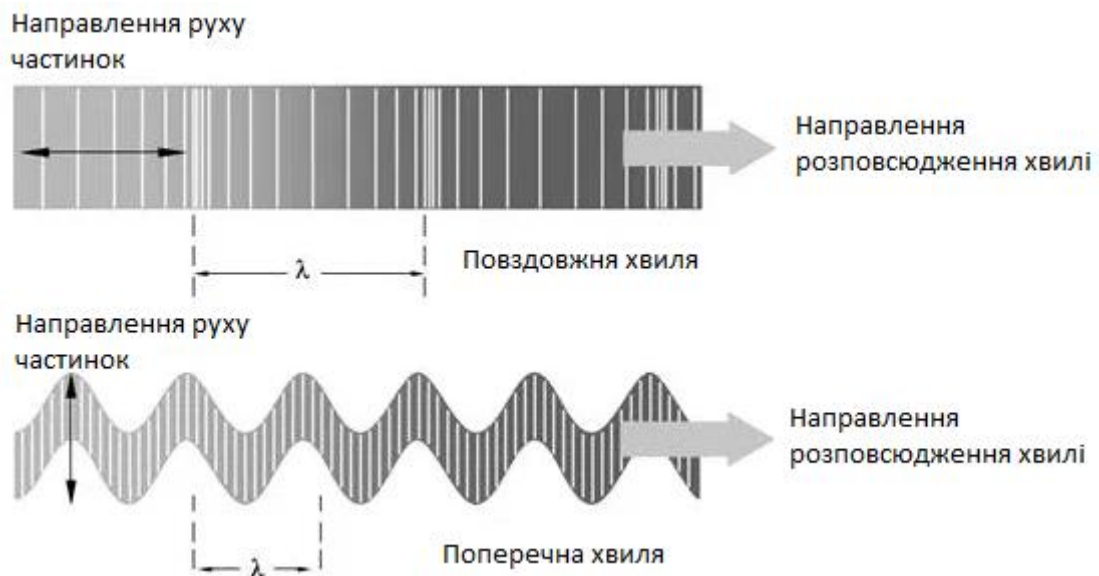


Рис. 1.1 Направлення руху ультразвукової хвилі.

У ультразвуковий діапазон входять частоти, від 20 тисяч до кількох мільярдів герц. Ці високочастотні коливання знаходяться за межами чутності вухом людини. Проте ультразвукові хвилі можуть сприймати деякі види тварин, наприклад, дельфіни, кити, щури та інші ссавці.

За фізичними властивостями ультразвукові хвилі є пружними, тому у них мало відмінностей від звукових хвиль. Відмінність між звуковими і ультразвуковими коливаннями досить умовна, вона залежить від суб'єктивного сприйняття слуху людини і дорівнює верхнього рівня чутного звуку.

Однак наявність значно вищих частот і невеликих довжин хвиль, надає ультразвуковим коливанням певні особливості:

| | | | | | | |
|------|-------|-----------|--------|------|--|-------|
| | | | | | | Арк.А |
| Змн. | Арк.А | № докум.№ | Підпис | Дата | | 9 |

- В залежності від виду речовини ультразвукові частоти мають різні швидкості, завдяки цьому можна з високою точністю визначати властивості процесів і також характеристики твердого тіла.
- Хвилі значної інтенсивності мають певні ефектами, які підкоряються нелінійної акустиці.
- При русі ультразвукових хвиль з високою потужністю в рідинах виникає явище акустичної кавітації. Дане явище є дуже важливим, оскільки в результаті даного явища виникає поле бульбашок, які утворюються з дуже маленьких частинок газу або пари рідкому середовищі. Вони пульсують з певною частотою і вибухають з величезним локальним тиском. Це створює сферичні ударні хвилі, що веде до появи акустичних мікроскопічних потоків. Завдяки використанню цього явища вчені навчилися очищати забруднені деталі, а також створювати торпеди, які рухаються у воді швидше за швидкість звуку.
- Ультразвук може бути сфокусований і сконцентрований, що дозволяє створювати звукові малюнки. Це властивість з успіхом застосовується в голографії і звуковому баченні.
- Ультразвукова хвиля цілком може виступати в якості дифракційної решітки.

Луна-імпульсний метод - найбільш поширений: ультразвуковий датчик генерує коливання і він же є приймачем. Приймає відбиті від дефектів луна-сигнали. Цей спосіб набув широкого застосування за рахунок своєї простоти, так як для проведення ультразвукового контролю потрібно тільки один датчик, таким чином при ручному проведенні контролю немає необхідності в пристроях для його фіксації (як, наприклад, у випадку дифракційно-часового методу) і суміщенні акустичних осей при використанні двох перетворювачів. Більше того, це приклад одного з небагатьох методів ультразвукової дефектоскопії, який дає змогу з високою точністю визначати координати дефекту, наприклад, глибину залягання і положення в ОК (щодо перетворювача).

| | | | | | | |
|------|-------|-----------|--------|------|--|-------|
| | | | | | | Арк.А |
| Змн. | Арк.А | № докум.№ | Підпис | Дата | | 10 |

Перспектива використання приладу для вимірювання швидкості УЗ лежить у дослідженні стану твердих матеріалів, і перш за все сталей, вироби з яких використовуються у силових конструкціях. Внаслідок своєї розповсюженості в природі та відносно малої вартості способів отримання заліза і його сплавів, займають головне місце в народному господарстві.

Сталь є основним конструкційним матеріалом для машинобудування, промислового будівництва, транспортних засобів і т. ін.. Швидкий розвиток промисловості був би неможливий без задоволення потреб у сучасній техніці і металевих виробах. Сталь - один з найбільш широко використовуваних металів у сучасному світі. Це дешево, міцно і неймовірно універсально. Зі світовим виробництвом приблизно 750 мільйонів тонн на рік сталь є другим товаром за масовим випуском поряд із цементом. Сталь повністю піддається вторинній переробці і для її виробництва потрібно порівняно мало енергії. Завдяки зусиллям металургійної промисловості споживання енергії та викиди вуглекислого газу становлять менше половини від рівня, що був у 1960-х. Це робить сталь дуже екологічно чистою та стійкою. Вироби зі сталі занадто численні, щоб їх тут перерахувати, але вони включають: залізничні шляхи, нафто- і газопроводи, хмарочоси, ліфти, метро, мости, автомобілі, кораблі, ножі та виделки, бритви та хірургічні інструменти. Сталь є скрізь! [1].

Сталь – це сплав заліза з вуглецем та іншими хімічними елементами з вмістом вуглецю до 2,14%. В залежності від складу розрізняють вуглецеву (Рис. 1.2) і леговану сталь (Рис. 1.3). В вуглецевій сталі утримуються 0,4...2% вуглецю. Вуглець додає сталі твердість. Сталь має унікальний баланс твердості, гнучкості та міцності на розрив. Він міцніший і тримає гостріший край краще, ніж м'якше коване залізо. У той же час він протистоїть ударам і натягу краще, ніж більш крихкий чавун.

| | | | | | | |
|------|-------|-----------|--------|------|--|-------|
| | | | | | | Арк.А |
| Змн. | Арк.А | № докум.№ | Підпис | Дата | | 11 |



Рис. 1.2 Структура вуглецевої сталі

При додаванні в сталь хрому, нікелю, ванадію – змінюються її властивості, одні елементи підвищують твердість, міцність, інші пружність. Сталі, у яких є ці елементи, називаються легованими.

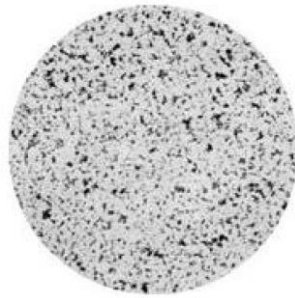


Рис. 1.3 Структура легової сталі

Існує чотири основні групи сплавів сталі: вуглецеві, інструментальні, леговані та нержавіючі сталі.

- Вуглецева сталь – сталь з легким, середнім та високим вмістом вуглецю різняться в основному за твердістю та пластичністю. М'які або низьковуглецеві сталі, як правило, більш пластичні в порівнянні з іншими сталями, але також мають нижчу твердість. На іншому кінці асортименту високовуглецеві сталі є більш твердими. Однак високовуглецева сталь зазвичай має нижчу пластичність.
- Інструментальна сталь - для інструментальних сталей використовується високовуглецева сталь з доданими елементами, такими як вольфрам, ванадій або молібден, термічно оброблена і загартована до вищої твердості.

| | | | | | | |
|------|-------|-----------|--------|------|--|-------|
| | | | | | | Арк.А |
| Змн. | Арк.А | № докум.№ | Підпис | Дата | | 12 |

- Легована сталь - це сімейство сталей, як правило, відноситься до сталей, змішаних з певними елементами, що мають надзвичайні властивості матеріалів, за винятком тих, які зазвичай належать до інших сімей. Всі сталі є сплавами, і багато з них мають додаткові елементи. Однак леговані сталі - це незвичайні сталі, виготовлені для конкретного застосування, і можуть варіюватися від цінних рецептур до екзотичних сплавів, що використовуються для реактивних двигунів.
- Нержавіюча сталь - ці сталі легуються хромом, щоб зробити їх стійкими до іржі завдяки пасивації.

По призначенню розрізняють конструкційну, інструментальну і спеціальну сталі. Фізико-хімічні властивості сталі, що визначають її якість, тобто ступінь відповідності для використання за призначенням або здатність задовольняти потреби споживачів, поділяють на дві групи. До першої групи можна віднести властивості, що визначають технологічність сталі, тобто здатність сталі підлягати тій, чи іншій обробці при отриманні готових виробів. До другої групи належать властивості, що визначають здатність сталі забезпечувати надійну і довготривалу придатність у готових виробах. За допомогою вимірювання швидкості ультразвуку можна визначити степінь механічних напружень матеріалів та оцінку запасу їх міцності.

1.2 Основні дефекти виробів зі сталі та причини їх виникнення

У процесі виготовлення металеві вироби проходять складний технологічний цикл. Він включає наступні основні операції: плавка, лиття, обробка тиском, термічна обробка, механічна обробка, з'єднання з іншими деталями. Окремі операції можуть випадати з цього ланцюжка або повторюватися кілька разів. Готові вироби зберігаються і експлуатуються, при цьому їх параметри можуть зазнавати зміни. У процесі технологічних операцій метал виробів змінюється. Для з'ясування характеру змін необхідно мати хоча б загальні уявлення про металознавстві.

| | | | | | | | | | |
|------|-------|-----------|--------|------|--|--|--|--|-------|
| | | | | | | | | | Арк.А |
| Змн. | Арк.А | № докум.№ | Підпис | Дата | | | | | 13 |

Чисті метали в техніці використовують досить рідко. Як правило, застосовують сплави металів. У найбільш простому випадку це бінарні сплави, тобто сплави двох компонентів.

Сталь - ковкий сплав заліза з вуглецем, а іноді також з поліпшуючими певні властивості (легуючими) елементами. Зміст вуглецю - не більше 2,14 %. Це найбільш поширений конструкційний матеріал.

Об'єктом контролю є двотаврова балка, отже, основною причиною наявності дефектів є низька якість сталевих заготовок, а також порушення технологічного процесу прокату заготовок.

Дефекти прокатного походження поділяють на дефекти нагрівання металу, власне прокатки і обробки.

До дефектів нагріву можна віднести окалиноутворення, обезвуглеводження поверхневого шару, перегрів і перепал сталі, внутрішні тріщини.

Внутрішні тріщини (рис.1.4) можуть з'являтися в результаті прискореного нагрівання (охолодження) сталей із зниженою теплопровідністю і пластичністю. Виникаючі внутрішні напруження в результаті перепадів температур і структурних перетворень можуть призвести до перевищення міцності сталей з подальшим утворенням в них внутрішніх несучільностей (тріщин).



Рис. 1.4. Внутрішні тріщини

Розшарування (рис. 1.5) - витягнуті, площинні порушення суцільності матеріалу різної величини, розташовані всередині прокатаних заготовок (переважно сутунок) вздовж напрямку прокатки. Може супроводжуватися здуттям поверхні листа.

| | | | | | | |
|------|-------|-----------|--------|------|--|-------|
| | | | | | | Арк.А |
| Змн. | Арк.А | № докум.№ | Підпис | Дата | | 14 |

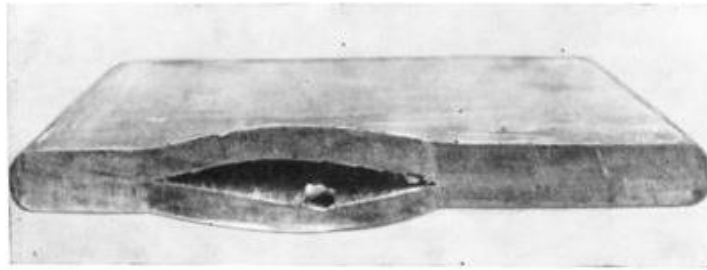


Рис.1.5. Розшарування

Порожнини від усадочної раковини (рис.1.6) - розташовані в поздовжньому напрямку порожнини в центральній зоні матеріалу, які найчастіше помітні на поперечному перерізі. Причиною виникнення є залишкові усадочні раковини, що утворилися в процесі затвердіння.

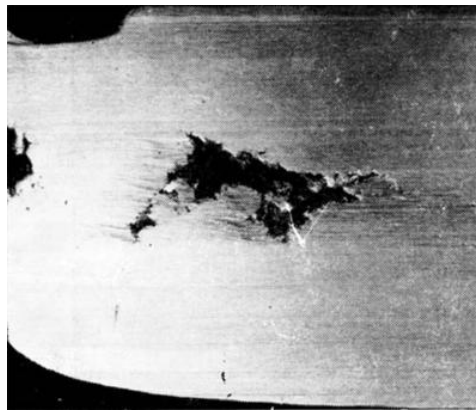


Рис.1.6. Порожнини від усадочних раковин

Неметалеві включення (рис.1.7) - порушення суцільності в металі, нерівномірно розподілені уздовж або поперек перетину, що мають найчастіше витягнуту форму. У прокатаних заготовках можуть зустрічатися як екзогенні, так і ендогенні включення. Серед причин виникнення - недостатній догляд за вогнетривкої футеровкою випускного отвору і розливних пристроїв (частинки вогнетривкового матеріалу потрапляють в процесі виплавки і розливання у рідкий метал і при затвердінні залишаються поблизу поверхні або всередині зливка); незадовільна якість вогнетривкового матеріалу (розмивання і викришування); занадто ранній слив шлаку; скупчення продуктів розкислення [3].

| | | | | | | |
|------|-------|-----------|--------|------|--|-------|
| | | | | | | Арк.А |
| Змн. | Арк.А | № докум.№ | Підпис | Дата | | 15 |

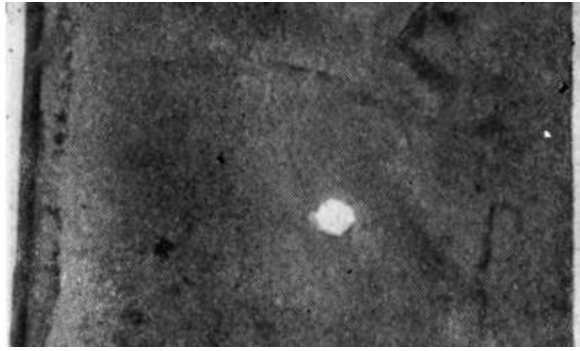


Рис. 1.7. Неметалеві включення

Флокени (рис.1.8) - внутрішні тріщини, що різко знижують механічні властивості сталі. На протравлених шліфах флокени виявляються у вигляді тонких волосовин, а в зламі загартованих зразків флокени являють собою овальні кристалічні плями сріблясто-білого кольору, що відрізняються від основної сірої маси зламу. Основна причина утворення флокенів - присутність в сталі підвищеної кількості водню, а найбільш ймовірний механізм цього процесу - адсорбція водню на поверхнях мікронесуцільностей з пониженням поверхневої енергії, що полегшує руйнування. Утворення зон з підвищеною адсорбцією водню, де зароджуються флокени, стимулюють внутрішні напруги, що виникають у сталі при структурних перетвореннях, пластичній деформації, нерівномірному охолодженні. Зниження опору металу руйнуванню в місцях концентрації напружень біля скупчень дефектів кристалічної решітки, неметалевих включень, ліквідаційних неоднорідностей також сприяє виникненню флокенів.

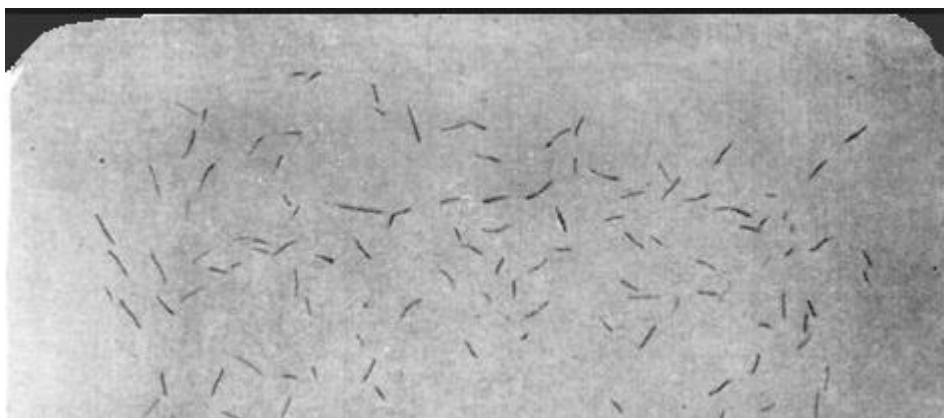


Рис.1.8. Флокени

| | | | | | | |
|------|-------|-----------|--------|------|--|-------|
| | | | | | | Арк.А |
| Змн. | Арк.А | № докум.№ | Підпис | Дата | | 16 |

1.3 Методи контролю виробів зі сталі

Сьогодні в будівельній індустрії проглядається тенденція активного застосування інструментальних засобів неруйнівного контролю, оскільки руйнівні методи нездатні забезпечити суцільний контроль якості продукції, що випускається. Що стосується металоконструкцій, то їх дослідження вимагають поєднання руйнівних і неруйнівних методів. Традиційні способи вивчення міцності властивостей виробів і конструкцій, пов'язаних з руйнуванням матеріалів або окремих елементів конструкцій, часто не дозволяють отримати об'єктивну оцінку їх стану. Особливо це характерно для споруджуваних і експлуатованих об'єктів [4].

Завданням НК якості різних споруд, в тому числі і металоконструкцій, є пошук відхилень їх технічних характеристик або параметрів від заданих в нормативних документах (НД). Це можуть бути дефекти типу порушення суцільності металоконструкцій, зміни фізико-механічних характеристик, геометричних розмірів. Методи і засоби НК дозволяють їх своєчасно виявляти, попереджати можливі руйнування і, як наслідок, виникнення аварій.

Застосування методів і засобів НК для діагностики заданих об'єктів регламентується нормативними документами (НД), що встановлюють вимоги до показників якості та способам їх перевірки.

Методи НК не є універсальними. Кожен з них має свої переваги і недоліки, обмеження областей використання і може бути застосований для виявлення конкретних дефектів. Тому вибір залежить від конкретних вимог практики, матеріалу, конструкції об'єкта, умов його роботи, техніко-економічних показників, виду дефектів.

Візуально виявити в металі конструкції можна лише поверхневі дефекти типу тріщин, розшарувань, забоїв, раковин і т.п. Вимірювальний контроль деталей, складальних одиниць засвідчує відповідність їх геометричних розмірів вимогам НД і допустимості розмірів виявлених при візуальному контролі поверхневих несуцільностей. Ці методи прості, доступні, легко застосовні і відносно недорогі,

| | | | | | | | | | |
|------|-------|-----------|--------|------|--|--|--|--|-------|
| | | | | | | | | | Арк.А |
| Змн. | Арк.А | № докум.№ | Підпис | Дата | | | | | 17 |

але малопродуктивні і досить суб'єктивні. Адже вірогідність контролю при їх використанні сильно залежить від досвіду і кваліфікації дефектоскопістів.

- Розглянемо основні методи НК, якими можливо виявляти дефекти сталевих двотаврових балок:

1.3.1 Магнітні методи неруйнівного контролю

Під час магнітного МНК аналізується взаємодія контрольованого ОК з магнітним полем, такі методи, як правило, застосовуються для виявлення внутрішніх і поверхневих дефектів в об'єктах, виготовлених з феромагнітних матеріалів.

Магнітні методи НК поділяють на магнітопорошковий, ферозондовий, індукційний і магнітографічний метод. Широкої популярності через свою надійність серед МНК свого виду здобув магнітопорошковий метод, який заснований на виникненні неоднорідності магнітного поля над місцем дефекту.

Ферозондовий метод неруйнівного контролю ґрунтується на виявленні ферозондовим перетворювачем магнітного поля розсіювання дефекту в намагнічених виробах і перетворенні його в електричний сигнал. Метод служить для виявлення поверхневих і підповерхневих (лежать в товщі матеріалу) дефектів типу порушень суцільності.

Метод дозволяє контролювати вироби довільних розмірів і форм, при умові, що відношення розміру довжини до найбільшого розміру в поперечному напрямку і їх магнітні властивості дозволяють досягти ступеня намагнічування, достатнього для створення магнітного поля розсіювання дефекту, виявленого за допомогою перетворювача.

Метод дозволяється застосовувати також для виявлення дефектів типу порушення суцільності зварних швів, для контролю якості структури і геометричних розмірів виробів.

Чутливість методу визначається магнітними характеристиками матеріалу контрольованого виробу, його формою і розмірами, способом контролю і видом

| | | | | | | | | | |
|------|-------|-----------|--------|------|--|--|--|--|-------|
| | | | | | | | | | Арк.А |
| Змн. | Арк.А | № докум.№ | Підпис | Дата | | | | | 18 |

намагнічування, чутливістю застосовуваного перетворювача і електронної апаратури, а також магнітним полем розсіювання дефекту.

Вироби, що подаються на намагнічуючі пристрої, повинні бути очищені від феромагнітних частинок і інших забруднень.

Залежно від магнітних властивостей матеріалу, розмірів і форми контрольованого виробу застосовують два способи контролю :

- спосіб прикладеного магнітного поля;
- спосіб залишкової намагніченості.

Контроль способом прикладеного поля полягає в намагнічуванні виробу та одночасній реєстрації перетворювачем магнітних полів розсіювання дефектів у присутності намагнічуючого поля.

Контроль способом залишкової намагніченості полягає в намагнічуванні виробу та реєстрації напруженості магнітних полів розсіювання дефектів перетворювачем після зняття намагнічуючого поля.

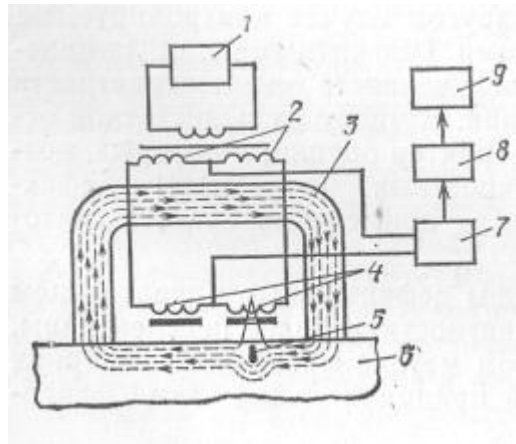


Рис.1.9. Структурна схема ферозондового дефектоскопу

1 - генератор опорної напруги; 2 - збуджуючі обмотки; 3 - постійний магніт; 4 - індикаторні обмотки; 5 - дефект; 6 - деталь; 7 - підсилювач; 8 - детектор; 9 - вимірювач електричного сигналу.

1.3.2 Радіаційні методи НК

При радіаційному МНК реєструють взаємодію з об'єктом проникаючого іонізуючого випромінювання з його подальшим аналізом. В залежності від виду

| | | | | | | |
|------|-------|-----------|--------|------|--|-------|
| | | | | | | Арк.А |
| Змн. | Арк.А | № докум.№ | Підпис | Дата | | 19 |

іонізуючого випромінювання в найменуванні методів може замінюватися назва, наприклад, слово «радіаційні» може мінятися на «рентгенівські», «нейтронні» та інші.

Здебільшого при контролі використовують гамма- і рентгенівське випромінювання, які дозволяють виявити різні види дефектів (як внутрішній, так і поверхневий).

Схема застосування радіаційного контролю методом проходження (варто відзначити, що метод відображення практично не використовується) наведена на рисунку 1.10.

Джерело 1 випромінює потік, що проходить крізь контрольований об'єкт 2. Випромінювання вловлюється приймачем 3 і за допомогою перетворювача 4 перетвориться в кінцевий результат.

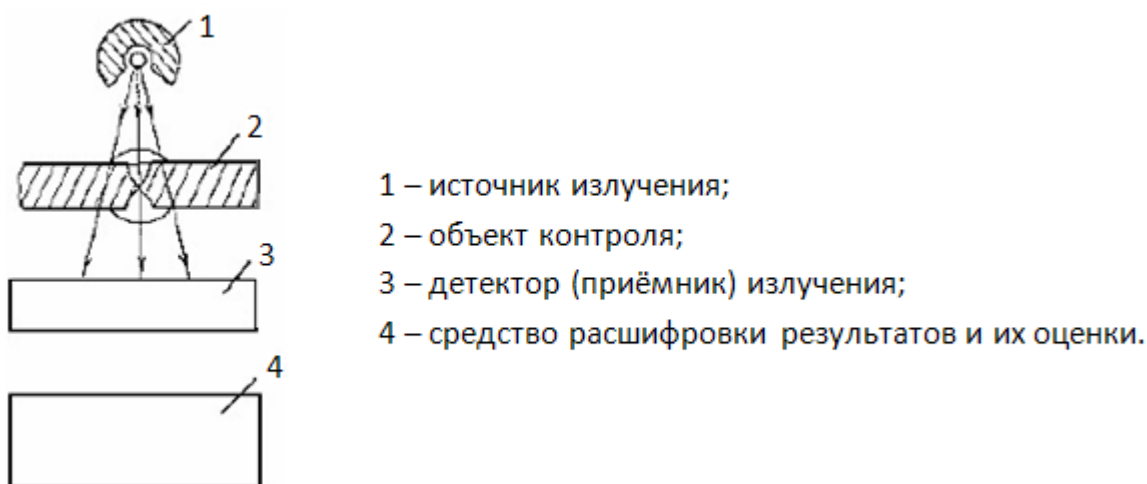


Рис. 1.10 – Схема застосування радіаційного контролю (метод проходження)

Залежно від того, який приймач випромінювання 3 використовується (сцинтиляційний лічильник фотонів і частинок, рентгенівська плівка або флюорисцуючий екран), розрізняють радіометричний, радіографічний і радіоскопічний методи.

Первинним інформативним параметром для даного методу виступає щільність потоку випромінювання, яка зростає в місцях дефектів.

| | | | | | | |
|------|-------|-----------|--------|------|--|-------|
| | | | | | | Арк.А |
| Змн. | Арк.А | № докум.№ | Підпис | Дата | | 20 |

1.3.3 Акустичні методи неруйнівного контролю

При акустичних МНК реєструють та аналізують параметри пружних хвиль, які збуджуються і/або виникають в об'єкті контролю. За використання хвиль в ультразвуковому діапазоні допустима заміна назви групи методів на «ультразвукові».

Параметри пружних хвиль тісно пов'язані з властивостями матеріалів такими як анізотропією, щільністю, пружністю і т.д., а акустичні властивості твердих об'єктів і повітря значною мірою відрізняються один від одного, тому стає зрозумілим, чому за допомогою акустичних МНК існує можливість виявляти наявність дефектів дуже малих розмірів (їх ширина може не перевищувати 10-6 мм), а також визначати якість шліфування і товщину поверхні.

В залежності від характеру взаємодії з ОК, розрізняють пасивні та активні методи контролю. У випадку пасивних методів реєструються хвилі, що виникають у самому об'єкті. До активних відносяться методи, засновані на вимірі інтенсивності акустичного сигналу, що пропускається або відбивається об'єктом. Результати застосування активного акустичного МНК представлені на рисунку 1.8.

У лівій частині рисунка зображений об'єкт, який не має дефектів і відповідний графік, на якому відображені інформативні параметри акустичної хвилі (в даному випадку час проходження через об'єкт). Справа зображено графік, що відповідає наявності дефекту.

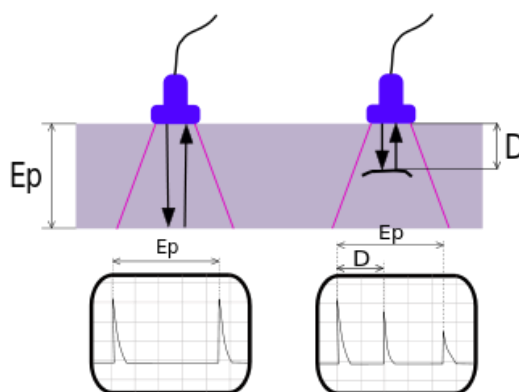


Рис. 1.11. Активний акустичний метод НК (відбиття)

| | | | | | |
|------|-------|-----------|--------|------|-------|
| | | | | | Арк.А |
| Змн. | Арк.А | № докум.№ | Підпис | Дата | 21 |

1.4 Актуальність визначення швидкості ультразвуку

Контроль ультразвуком двотаврової балки проводиться за допомогою луна-імпульсного методу. Це один із найбільш поширених методів. Пояснюється це тим, що на відміну від інших цей метод застосовується при односторонньому доступі до досліджуваного об'єкта але при цьому дозволяє визначити його координати, розміри та характер.

У луна-імпульсному методі ультразвукової дефектоскопії (УЗД) використовуються ті ж принципи, що і в радіо- і акустичної локації.

Сучасний луна-метод УЗД заснований на випромінюванні в контрольований виріб коротких імпульсів пружних коливань (тривалістю 0,5 - 10 мкс) і реєстрації інтенсивності (амплітуди) і часу приходу луна-сигналів, відбитих від дефектів відбивачів.

Імпульсний луна-метод дозволяє вирішувати наступні завдання дефектоскопії:

- Виявлення і визначення координат дефектів, що представляють собою порушення суцільності і розташованих як на поверхні, так і всередині металевих і неметалевих виробів і в зварних з'єднаннях.

- Визначення розмірів дефектів і виробів.

- Виявлення зон крупнозернистості в металевих виробах і заготовках.

- Апаратура, що реалізує даний метод, дозволяє визначити характер дефектів, ідентифікувати їх за розмірами, формами, орієнтацією.

До основних характеристик методу відносяться : чутливість, максимальна глибина проникання, мінімальна глибина ("мертва" зона), роздільна здатність, точність вимірювання відстані, продуктивність контролю.

Під чутливістю розуміють мінімальний розмір дефекту, що знаходиться на максимальній глибині і чітко реєструється приладом. Кількісно її визначають порогом чутливості. Для луна-методу - це мінімальна площа штучного дефекту типу плоскодонного отвору, який виявляється при контролі. Її можна визначити за відбивачем іншого типу, виконуючи перерахунок на площу плоскодонного отвору за формулами акустичного тракту. Поріг чутливості обмежується двома головними

| | | | | | | |
|------|-------|-----------|--------|------|--|-------|
| | | | | | | Арк.А |
| Змн. | Арк.А | № докум.№ | Підпис | Дата | | 22 |

факторами: чутливістю апаратури і рівнем перешкод. Залежно від структури матеріалу буде змінюватися і поріг чутливості.

Максимальна глибина проникнення визначається максимальною відстанню від дефекту (відбивача) заданого розміру, на якому він упевнено виявляється. Вона обмежується умовою, щоб сигнал від дефекту був більше мінімального сигналу, реєстрованого приладом і рівня перешкод. Вона також визначається параметрами апаратури. У технічних характеристиках приладу як максимальну глибину проникання вказують максимальну тривалість розгортки дефектоскопа. Досягнення максимальної глибини проникання обмежується тими ж факторами, які перешкоджають підвищенню чутливості.

Мінімальна глибина або "мертва" зона - мінімальна відстань від перетворювача або від поверхні виробу до дефекту, на якому він чітко виявляється не зливаючись із зондуючим імпульсом чи імпульсом від поверхні введення ультразвуку.

Роздільна здатність - мінімальна відстань між двома однаковими дефектами, при якому вони реєструються роздільно. Розрізняють променеву і фронтальну роздільну здатність методу. Променева роздільна здатність - мінімальна відстань в променевому напрямку, при якому сигнали від дефектів видно на екрані як два роздільних імпульси.

Фронтальна роздільна здатність по переміщенню - мінімальна відстань між дефектами в напрямку перпендикулярному променевому. Точність вимірювання відстані до дефекту визначається похибкою в % від вимірюваної величини. Продуктивність контролю визначається кроком і швидкістю сканування (переміщення) перетворювача. При оцінці часу контролю враховується і час на дослідження дефекту.

Для надійного виявлення дефектів повинні бути виконані дві умови:

1. Сигнал від дефекту повинен проходити мінімальний сигнал, записаний реєстром приладів:

$$V_{\text{д}} > V_{\text{мін}}$$

| | | | | | | |
|------|-------|-----------|--------|------|--|-------|
| | | | | | | Арк.А |
| Змн. | Арк.А | № докум.№ | Підпис | Дата | | 23 |

2. Сигнал від дефекту повинен бути більшим, ніж сигнал від завад:

$$V_{\text{д}} > V_{\text{пом}}$$

Крім того, від правильного підбору частоти ультразвукових коливань залежить потужність отриманого сигналу від дефекту і в результаті точність визначення дефекту. Можна зробити висновок, що від вибору частоти залежить якість контролю.

При малих відстанях від перетворювача до дефекту вплив загасання ультразвуку невеликий, саме тому в ближній зоні раціонально застосовувати високі частоти. У дальній зоні загасання має дуже велике значення для раціонального вибору частоти. Із збільшенням товщини виробу слід знижувати частоту.

При ультразвуковій дефектоскопії матеріалів і виробів, як і при інших видах дефектоскопії спостерігаються завади. Їх ділять на кілька видів:

- Завади підсилювача дефектоскопа. Вони перешкоджають безмежному збільшенню коефіцієнта підсилення тракту дефектоскопа, що працює на прийняття сигналу, і визначають граничне значення прийнятого приладом сигналу $V_{\text{мін}}$;

- Власні шуми перетворювача, які виникають під час його роботи за сумісною схемою. Одразу після випромінювання зондуючого імпульсу чутливість підсилювача різко послаблюється через сильний динамічний вплив на нього потужного сигналу від генератора. Через це в контрольованій зоні різко підвищується граничне значення прийнятого приладом сигналу $V_{\text{мін}}$.

- Наявність багаторазових відбиттів у протекторі, призмі перетворювача, контактній рідині створює завади, що затягують дію зондуючого імпульсу;

- Хибні сигнали, що виникають в результаті прийняття хвиль, які віддзеркалилися від виступів і інших нерівностей поверхні об'єкта контролю. Такі перешкоди перешкоджають якісному контролю на певних ділянках ОК;

- Завади, які пов'язані з розсіюванням ультразвуку на структурних неоднорідностях, зернах матеріалу, тобто структурною реверберацією. Сигнали від неоднорідностей в залежності від фази послаблюють або підсилюють один одного. Вони мають статистичний характер.

| | | | | | | |
|------|-------|-----------|--------|------|--|-------|
| | | | | | | Арк.А |
| Змн. | Арк.А | № докум.№ | Підпис | Дата | | 24 |

У випадку, коли дефект перебуває в дальній зоні, то для поліпшення його виявлення доцільно збільшувати розміри перетворювача. При збільшенні діаметра перетворювача покращується направленість випромінювання, але сама межа ближньої зони віддаляється від перетворювача і за умови $r_{\text{н}} = a^2/\lambda$ дефект потрапляє в ближню зону. Збільшення діаметра перетворювача у ближній зоні чинить негативний вплив на відношення сигнал-шум, що в свою чергу спричиняє погіршення спрямованості перетворювача.

Один з шляхів усунення згаданих вище явищ є використання фокуруючих перетворювачів. Для підвищення променевої роздільної здатності необхідно зменшити тривалість імпульсу. У випадках контролю ОК великої товщини часом важко розрізнити на екрані два близько розташованих імпульси, це усувають за допомогою введенням затриманої розгортки.

Щоб покращити роздільну здатність дальній зоні потрібно покращувати напрямленість перетворювача через збільшення його діаметра і частоти. У ближній зоні доцільне застосування фокууючих перетворювачів.

1.5 Вибір методу визначення швидкості ультразвуку в сталях

У літературі описана велика кількість різних методів вимірювання швидкості звуку в різних середовищах. Кожен з них має свої переваги і недоліки. Основне завдання при конструюванні вимірювальної апаратури полягає у виборі оптимального методу, що поєднує в собі точність вимірювань і простоту реалізації. Методи вимірювання ультразвукової швидкості поділяють на оптичні, інтерферометричні, резонансні і імпульсні, останні два вважаються найбільш точним. Резонансні методи визначення пружних сталей твердих тіл засновані на вимірі власних резонансних частот досліджуваного зразка, що представляє собою систему з розподіленими параметрами. Розрахунок таких систем дуже складний, тому форму зразка вибирають, виходячи з умови збудження тільки одного заданого типу коливань. Розрізняють низькочастотні і

| | | | | | | |
|------|-------|-----------|--------|------|--|-------|
| | | | | | | Арк.А |
| Змн. | Арк.А | № докум.№ | Підпис | Дата | | 25 |

високочастотні резонансні методи . Низькочастотні резонансні методи застосовуються для визначення пружних постійних і внутрішнього тертя в твердих тілах.

Дані методи дозволяють поєднувати високу точність вимірювань з простотою апаратури. З їх допомогою вдається дослідити матеріали з великим загасанням ультразвуку, однак, точність цих вимірів зменшується при збільшенні втрат в зразку. У той же час низькочастотні резонансні методи не придатні для вимірювань швидкості в зразках малих розмірів і не дозволяє вивчати властивості будь-якого конкретного зразка в різних напрямках.

Оцінюючи високочастотний резонансний метод, необхідно відзначити наступне:

- Метод придатний для вимірювання швидкості пружних хвиль в зразках малих розмірів. Можливі вимірювання в різних напрямках в одному і тому ж зразку.
- Схеми вимірювальних установок прості і, як правило, складаються з серійних промислових приладів.
- За точністю метод дещо поступається імпульсно-фазовим методам, тому похибка вимірювань залежить від величини загасання ультразвукових хвиль в зразку і зазвичай лежить в межах від 0.01 до 0.001%.
- Застосування резонансних методів ускладнюється, коли в монокристалічному зразку можливе поширення різних типів хвиль з різними швидкостями. Перевагою імпульсних методів є мала потужність, яка спрямовується в досліджувану речовину, завдяки чому його енергетичні характеристики не змінюються в процесі проведення вимірювань. За рахунок того, що в даному випадку до перетворювача можна підводити вищу електричну напругу, досягається більш висока точність вимірювання.

Імпульсні методи можна розділити на абсолютні і відносні. До абсолютних відносяться:

| | | | | | | |
|------|-------|-----------|--------|------|--|-------|
| | | | | | | Арк.А |
| Змн. | Арк.А | № докум.№ | Підпис | Дата | | 26 |

- Методи прямого відліку часу поширення ультразвукового сигналу на відому відстань.
- Метод, який використовує виникнення стоячих хвиль в окремих частинах обсягу, в якому поширюються коливання.
- Метод суперпозиції імпульсів, заснований на вимірюванні частоти повторення імпульсів, орієнтованих так, що запуск кожного наступного пакета імпульсів починається в момент переходу відбитого пакета імпульсів.

Імерсійні методи, засновані на вимірі критичних кутів відображення для зразка, зануреного в рідину з відомими властивостями.

- Метод кільцевих автоколивальних схем, заснований на самозапуску імпульсної системи з позитивним зворотним зв'язком. При цьому частота проходження імпульсів визначає вимірювану швидкість.

Відносні методи засновані на порівнянні часу поширення ультразвукових хвиль в досліджуваному зразку і в еталонній лінії, швидкість звуку в якій відома. Відлік часу поширення імпульсу може здійснюватися: по максимуму обвідної імпульсу, з його переднього фронту, методом порівняння фаз [5].

Отже, існує багато методів ультразвукової дефектоскопії, проте один з найбільш розповсюджених методів є луна-імпульсний метод УЗК. Тому що цей метод - на відміну від інших - можна використовувати при доступу до ОК з однієї сторони, і при цьому є можливість визначати розміри дефекту, знаходити його розташування за координатами та характер. Луна-імпульсний метод ультразвукової дефектоскопії (УЗД) використовує ті ж принципи, що і при радіо - та акустичній локації.

Для визначення швидкості повздовжніх хвиль в сталях доцільно застосовувати луна-імпульсний метод. Цей метод є одним з найбільш універсальних методів НК. Він дає змогу контролювати різні властивості такі, як довжину, товщину, структуру матеріалу виробів, які виготовлені з акустично прозорих матеріалів, наприклад, металів, пластмас та ін.. Також він не вимагає

| | | | | | | | | | |
|------|-------|-----------|--------|------|--|--|--|--|-------|
| | | | | | | | | | Арк.А |
| Змн. | Арк.А | № докум.№ | Підпис | Дата | | | | | 27 |

демонтажу деталі з конструкції, контроль можна проводити в умовах роботи ОК, якщо є достатній доступ до деталі.

В умовах виробництва, цей метод широко використовують для виявлення дефектів лиття, зварювання, кування, штампування, прокату тощо. Для виміру швидкості луна-метод підходить найкраще.

Принцип контролю луна-імпульсним методом можна побачити на рисунку 1.12 він полягає в тому, що в ОК надсилають короткі імпульси (тривалістю приблизно 1-3 мкс) ультразвукових коливань з інтервалом 1-5 мс.

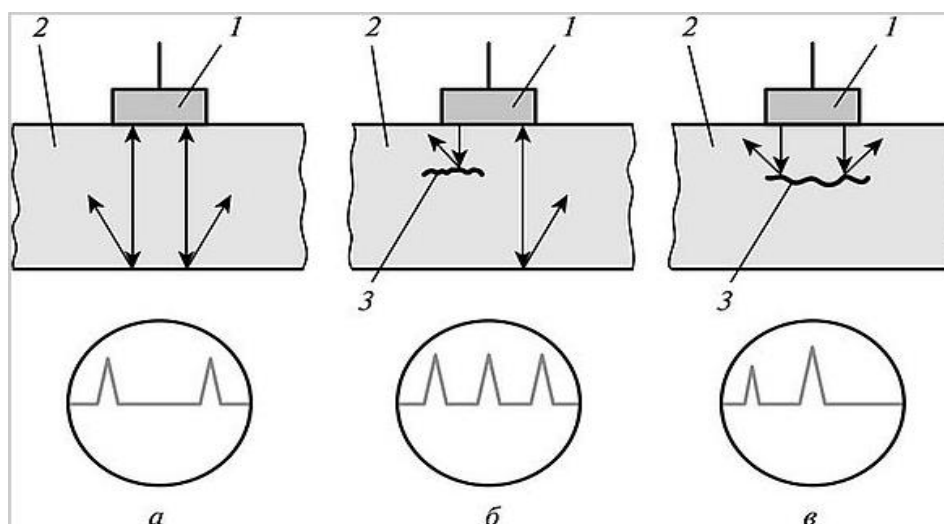


Рис. 1.12. Принцип роботи луна-імпульсного методу.

Перетворювач, який випромінює ультразвукову хвилю в ОК може одночасно використовувати і приймати сигнал від дефекту. Ультразвуковий імпульс проходячи через ОК 2 і, відбиваючись від його протилежної сторони, повертається до приймача(випромінювача). Прийнятий відбитий сигнал також реєструється приладом (рис. 1.12, а). У випадку, коли на шляху ультразвукової хвилі в деталі є несучільність (дефект) 3, то на дисплеї з'явиться додатковий сигнал (рис. 1.12, б). Коли дефект повністю перекриває ультразвуковий пучок, то на екрані приладу відбитий імпульс буде відсутній (рис. 1.12, в). Розмір прийнятого сигналу дає уявлення про розміри дефекту, а часовий проміжок поміж введеним в виріб початковим імпульсом і прийнятим відбитим сигналом дозволить визначити глибину його залягання.

Реєстрація луно-сигналів виконується шляхом перетворення відбитих хвиль в електричні імпульси, підсилення та реєстрації дефектоскопом. Підсилення сигналу виконують нелінійно, тобто більш потужний сигнал посилюється в меншій мірі, ніж слабший.

Луна-імпульсний метод дозволяє здійснювати: виявлення та визначення координат дефектів; визначення розмірів дефектів і виробів; виявлення зон крупнозернистості у виробках і заготовках. Визначною характеристикою луна-методу є те, що при контролі виробів реєструють і аналізують практично всі сигнали, що надходять від ОК після випромінювання зондувальних коливань.

При контролі даним методом спостерігають перешкоди. Їх поділяють на такі види:

- перешкоди підсилювача дефектоскопа. Такі перешкоди заважають безмежному збільшенню коефіцієнта підсилення тракту прийняття дефектоскопу і визначають граничне значення реєстрованого приладом сигналу. На дисплеї приладу при великому підсиленні можна побачити як збільшення товщини або розмиття лінії розгортки;
- шуми перетворювача, що виникають при його роботі по поєднаній схемі (багаторазові відображення в протекторі, призмі ПЕП). Послаблення чутливості підсилювача через потужний сигнал генератора зондуючих імпульсів. Тому в ближній зоні до зондуючого сигналу можна побачити слідувачі за зондуючими імпульси. За контакту ПЕП з будь-яким виробом або пальцем дефектоскопіста перешкоди ПЕП міняють свою амплітуду, проте вони зберігають своє положення на лінії розгортки. Корисний сигнал на фоні високої амплітуди перешкод можна виділити через те, що він переміщується по лінії розгортки під час пересування перетворювача. Ці перешкоди виключають шляхом удосконалення конструкції перетворювача. Наприклад, для РС ПЕП ці перешкоди мінімальні;
- помилкові сигнали від виступів і інших нерівностей поверхні. Такі перешкоди перешкоджають визначенню дефектів на окремих ділянках ОК.

Рівень помилкових сигналів зменшують шляхом зміни схеми контролю,

| | | | | | | |
|------|-------|-----------|--------|------|--|-------|
| | | | | | | Арк.А |
| Змн. | Арк.А | № докум.№ | Підпис | Дата | | 29 |

наприклад, збільшують кут введення ПЕП. Перешкоди від хибних сигналів відрізняють від корисних шляхом точного вимірювання координат залягання відбивача;

- перешкоди розсіюванням ультразвуку на структурних неоднорідностях, зернах матеріалу. Відбиті сигнали від неоднорідності залежно від фази послаблюють або підсилюють один одного. На дисплеї вони показані у вигляді великого числа імпульсів, неупорядковано змінюються по амплітуді і положенню на лінії розгортки вздовж руху ПЕП. Матеріали, які містять велику кількість великих зерен, сильно відбивають ультразвук, можуть давати сигнали, схожі на сигнали від дефектів. Такі матеріали контролюють іншими методами НК., не ультразвуком.

Переваги луна-імпульсного методу:

- потрібен тільки доступ до виробу з однієї сторони;
- велика чутливість до внутрішніх дефектів;
- висока точність визначення координат дефектів.

Недоліки луна-імпульсного методу:

- низька стійкість до поверхневих неоднорідностей поверхні;
- різка залежність амплітуди сигналу від орієнтації дефекту;
- неможливість забезпечення якості акустичного контакту в процесі переміщення ПЕП.

1.6 Огляд існуючих приладів

Функцію вимірювання швидкості ультразвуку в сталях можуть виконувати ультразвукові товщиноміри налаштовані на швидкість при відомій товщині об'єкта контролю. Для прикладу розглянемо декілька з них.

Ультразвуковий товщиномір NOVOTEST УТ-1 (Рис.3.1).

| | | | | | | |
|------|-------|-----------|--------|------|--|-------|
| | | | | | | Арк.А |
| Змн. | Арк.А | № докум.№ | Підпис | Дата | | 30 |



Рис. 1.13 Ультразвуковий товщиномір УТ-1

Особливості ультразвукового товщиноміра УТ-1:

- простота в роботі і зручність в налаштуванні товщиноміра
- товщиномір відображає наявність акустичного контакту на графічному індикаторі
- фіксація товщиноміром останнього результату вимірювання при відриві перетворювача від поверхні
- легкий, зручний в роботі
- товщиномір має інтуїтивно зрозумілі органи управління



Рис. 1.14. Ультразвуковий товщиномір А1210

Відмінні особливості:

- Кольоровий висококонтрасний TFT дисплей;
- Режим А-скан з можливістю збереження кадрів;

| | | | | | | |
|------|-------|-----------|--------|------|--|-------|
| | | | | | | Арк.А |
| Змн. | Арк.А | № докум.№ | Підпис | Дата | | 31 |

- Зв'язок з ПК по USB;

Комплект поставки:

- Електронний блок ультразвукового товщиноміра А1210 з вбудованим акумулятором
- Перетворювач S3567 2.5A0D10CL
- Перетворювач D1771 4.0A0D12CL
- Кабель LEMO-LEMO одинарний 1,2 м
- Кабель LEMO-LEMO подвійний 1,2 м
- Адаптер 220 В-USB

Ультразвуковий товщиномір УТ-31 (рис 3.3).

Його використовують для вимірювання товщини металевих і неметалевих матеріалів (листів, труб, трубопроводів, мостових, корпусних, транспортних та інших конструкцій) при односторонньому доступі, в процесі виготовлення, експлуатації або ремонту в різних сферах.

Широкий діапазон вимірюваних товщин від 0,5 до 300 мм (для сталі).

Спеціальний режим вимірювання товщини стінки виробів з шаром фарби без урахування товщини фарби. Легкий спосіб заміни і велика кількість перетворювачів дозволяє контролювати вироби різної форми, з різноманітними фізико-механічними властивостями, а також вироби з високою шорсткістю [7].



Рис. 1.15. Ультразвуковий товщиномір УТ-31

| | | | | | | |
|------|-------|-----------|--------|------|--|-------|
| | | | | | | Арк.А |
| Змн. | Арк.А | № докум.№ | Підпис | Дата | | 32 |

Вбудована енергонезалежна пам'ять дозволяє зберігати в приладі цифрові результати вимірювань і графічні (B-scan) зображення профілю виробу з подальшою передачею на ПК по каналу USB. Прилад виготовлений в малогабаритному і міцному металевому корпусі з довговічною клавіатурою і розрахований на тривалу експлуатацію.

Відмітні особливості:

- великий інформативний графічний індикатор з яскравим підсвічуванням;
 - можливість регулювання посилення в діапазоні ± 20 дБ;
 - зручна структура меню;
 - визначення швидкості ультразвуку в матеріалі;
 - методи вимірювання:
 - імпульс-відлуння;
 - луна-луна (для вимірювання товщини металу під лакофарбовим покриттям із застосуванням спеціального датчика);
 - одночасна індикація: поточного і мінімального значення вимірюваної товщини; типу перетворювача; відносного рівня посилення в дБ; швидкості ультразвуку;
 - режими відображення:
 - цифровий (поточний і мінімальне значення вимірюваної товщини);
 - великі цифри;
 - B-scan (зображення профілю протилежної поверхні);
 - передача даних на ПК по інтерфейсу USB;
- міцний малогабаритний металевий корпус.

1.7 Вибір структурної схеми

Існує достатньо схем луна-імпульсних товщиномірів. Наприклад схема яка описана в книзі «Основи ультразвукового неруйнівного контролю».

| | | | | | | |
|------|-------|-----------|--------|------|--|-------|
| | | | | | | Арк.А |
| Змн. | Арк.А | № докум.№ | Підпис | Дата | | 33 |

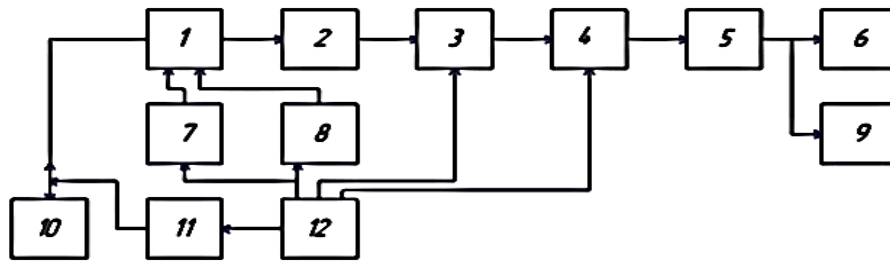


Рис. 1.16. Структурна схема луна-імпульсного товщиноміра

1 – широкосмуговий підсилювач високої частоти з діодним обмежувачем на вході і низьким вихідним опором; 2 – широкосмуговий підсилювач з автоматичним регулюванням підсилення; 3 – схема селекції; 4 – блок формування вимірювального інтервалу; 5 – блок перетворення вимірювального інтервалу в цифровий код; 6 – блок цифрової індикації; 7 – блок захисту від завад; 8 – блок часового регулювання чутливості; 9 – блок допускового контролю; 10 – ультразвуковий перетворювач; 11 – генератор зондувальних імпульсів; 12 – генератор синхроімпульсів.

Для вимірювання швидкості звуку, необхідно виміряти час проходження імпульсу в ОК при його відомій товщині:

$$C = \frac{2h}{\tau} \quad (1.1)$$

Такий принцип роботи звичайного ультразвукового товщиноміра, тільки в тому випадку відома швидкість звуку, а не товщина.

$$h = \frac{C * \tau}{2} \quad (1.2)$$

де C - швидкість звуку у виробі, а τ – час проходження звуку в ОК в прямому і зворотньому напрямку(вимірювальний інтервал).

В даному випадку товщиномір по факту вимірює тільки інтервал τ , а другий невідомий параметр потрібно вводити ззовні, тобто налаштовувати на швидкість ультразвуку у виробі за зразком або ділянкою виробу з відомою товщиною.

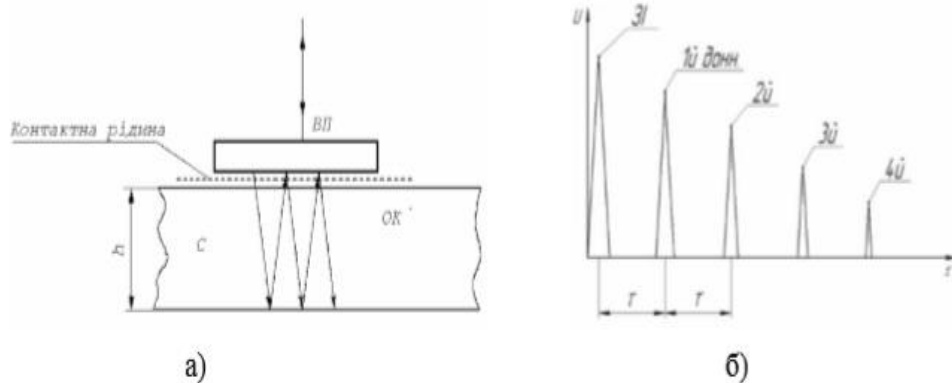


Рис. 1.17 – Принцип роботи ультразвукового товщиноміра

Через те, що принцип роботи однаковий – вимірювання часу проходження імпульсу. Тому я обираю структурну схему приладу на основі ультразвукового товщиноміра Рис. 3.6.

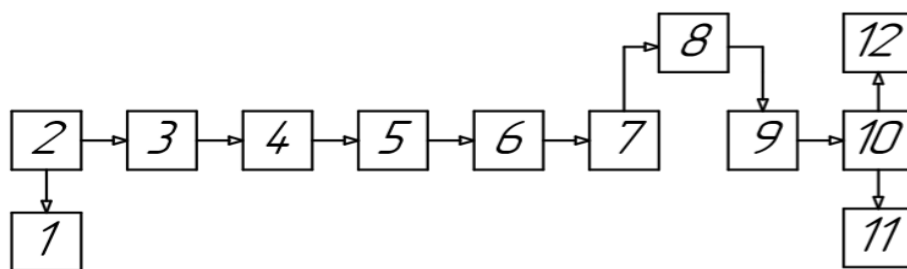


Рис. 1.18. Структурна схема приладу:

1 – П'єзоелектричний перетворювач; 2 - Генератор зондуючих імпульсів; 3 – Схема захисту; 4 – Підсилювач; 5 – Фільтр; 6 – Автоматичне регулювання підсилення; 7 – Аналогово – цифровий перетворювач; 9 - Пам'ять; 10 – Мікроконтролер; 11 – Клавіатура; 12 – LCD дислей

2. РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

2.1. Розрахунок п'єзоперетворювача

Для задачі даного дипломного проекту виберемо прямий суміщений ПЕП. Для збудження ультразвукових коливань в об'єкті контролю буде використовуватися контактний спосіб. Прямі перетворювачі це такі перетворювачі, які випромінюють в ОК і приймають пружні хвилі під прямим кутом до поверхні ОК, що перебуває у безпосередньому контакті з перетворювачем. Основний елемент перетворювача це п'єзоелемент 1 (рис. 2.1), він здійснює перетворення електричної енергії в енергію пружних коливань і навпаки. Товщину п'єзоелементу (як правило виготовленого з п'єзокераміки) визначають через робочу частоту f . На обидві сторони п'єзоелемента нанесені електроди, їх товщина тисячна частка міліметра. Провідники, по яких до п'єзоелемента підходить або відходить електричний сигнал, припаюють низькотемпературним припоєм або закріплюють електропровідним клеєм або просто забезпечують надійний електромеханічний контакт. Радіальні коливання п'єзоелемента гасяться шляхом введення його кромки в демпфуючу масу. Прямі контактні перетворювачі серійно випускають на частоти 25 кГц÷25 МГц.

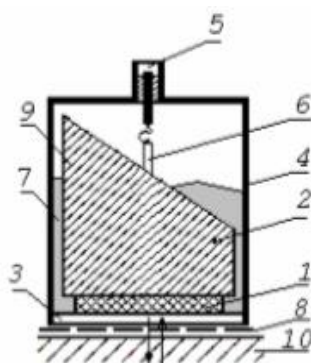


Рис. 2.1. Елементи конструкції суміщеного ультразвукового перетворювача з нормальним вводом: 1- п'єзоелемент, 2-демпфер, 3-протектор (захисне донце), 4- корпус, 5-електричний з'єднувач, 6-струмопідвід, 7-заливальний компаунд, 8- контактний шар (рідина), 9-акустична пастка, 10-ОК

| | | | | | |
|------|-------|-----------|--------|------|-------|
| | | | | | Арк.А |
| Змн. | Арк.А | № докум.№ | Підпис | Дата | 36 |

Частота проведення контролю $f = 5$ МГц . Визначимо товщину h ПЕП. Обираю ПЕП, який виготовлено із матеріалу ЦТС-19, швидкість ультразвуку в даному матеріалі $C_{цтс} = 3300$ м/с тоді товщина п'єзопластини :

$$h = \frac{C_{цтс}}{2 * f} = \frac{3300}{2 * 5 * 10^6} = 0.33 * 10^{-3} \text{ (м)} \quad (2.1)$$

Через товщину ПЕП знайдемо довжину хвилі, швидкість в ОК $C_{ок} = 5900$ м/с :

$$\lambda = \frac{C_{ок}}{f} = \frac{5900}{2 * 5 * 10^6} = 1.18 * 10^{-3} \text{ (м)} \quad (2.2)$$

Оскільки у нас ПЕП круглої форми. З конструктивних міркувань обиремо діаметр п'єзопластини $d_{п} = 12$ мм.

Визначу глибину ближньої зони $a = d_{п}/2$:

$$r_{bl} = \frac{a^2}{\lambda} = \frac{6 * 10^{-6}}{1.18 * 10^{-3}} = 5 * 10^{-3} \text{ (м)} \quad (2.3)$$

Звідси можна визначити дальню зону:

$$r_{dal} = 3r_{bl} = 5 * 10^{-3} \quad (2.4)$$

Площу перетворювача розрахуємо за формулою:

$$S_{пеп} = \pi * a^2 = 18,84 * 10^{-6} \text{ (м}^2\text{)} \quad (2.5)$$

2.2. Розрахунок акустичного тракту

Акустичний тракт – це шлях, який ультразвукова хвиля проходить від випромінювача до приймача. Акустичний тракт – це виключно механічний тракт.

Для аналізу акустичного тракту нам необхідно скласти його схему, розрахувати звукові поля випромінювання-прийому з урахуванням його характеристик. Основною характеристикою акустичного тракту є коефіцієнт ослаблення акустичного тракту $K_{а.т}$.

Так як вимірювання проводяться у дальній зоні(діапазон вимірюваних товщин 20-50 мм) розрахую $K_{а.т}$ у випадку, коли відбивачем служить плоска горизонтальна

| | | | | | | |
|------|-------|-----------|--------|------|--|-------|
| | | | | | | Арк.А |
| Змн. | Арк.А | № докум.№ | Підпис | Дата | | 37 |

поверхня, яка знаходиться в дальній зоні випромінювача, її розміри значною мірою перевищують розміри випромінювача, тобто відбивач повністю перекриває акустичний тракт (рис 2.2)

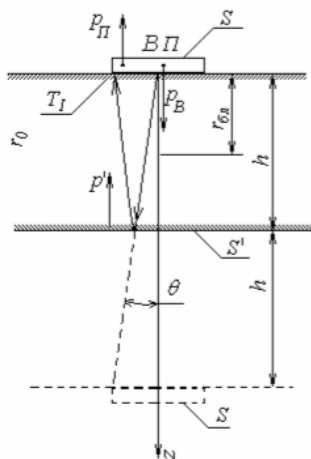


Рис. 2.2. Променева картина акустичного тракту

Характеристики середовищ:

а) Швидкість поширення:

ЦТС-19 – $C_{\text{ЦТС}} = 3300$ (м/с)

Сталь – $C_{\text{ОК}} = 5900$ (м/с)

б) Густина:

ЦТС-19 – $\rho_{\text{ЦТС}} = 7450$ (кг/м³)

Сталь – $\rho_{\text{ОК}} = 7700$ (кг/м³)

Розрахунок імпедансів середовищ за формулою:

$$Z_i = C_i \cdot \rho_i \quad (2.7)$$

а) Імпеданс ЦТС-19:

$$Z_{\text{ЦТС}} = C_{\text{ЦТС}} \cdot \rho_{\text{ЦТС}} = 3300 \left(\frac{\text{М}}{\text{С}} \right) \cdot 7450 \left(\frac{\text{КГ}}{\text{М}^3} \right) = 24.5 \cdot 10^6 \quad (2.7)$$

б) Імпеданс сталі:

$$Z_{\text{ОК}} = C_{\text{ОК}} \cdot \rho_{\text{ОК}} = 5900 \left(\frac{\text{М}}{\text{С}} \right) \cdot 7700 \left(\frac{\text{КГ}}{\text{М}^3} \right) = 45.4 \cdot 10^6 \quad (2.7)$$

Розрахунок коефіцієнту проходження за формулою :

| | | | | | | |
|------|-------|-----------|--------|------|--|-------|
| | | | | | | Арк.А |
| Змн. | Арк.А | № докум.№ | Підпис | Дата | | 38 |

$$T_i = \frac{4 \cdot Z_1 \cdot Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (2.8)$$

де Z_1, Z_2 – імпеданс в 1 та 2 середовищі відповідно.

$$T_{\text{цтс-сталь}} = \frac{4 \cdot Z_{\text{цтс}} \cdot Z_{\text{ок}}}{(Z_{\text{цтс}} + Z_{\text{ок}})^2} = \frac{4 \cdot 24,5 \cdot 10^6 \cdot 45,4 \cdot 10^6}{(24,5 \cdot 10^6 + 45,4 \cdot 10^6)^2} = 0,91 \quad (2.8)$$

Коефіцієнт відбиття по тиску R_p від межі поділу середовищ сталь-повітря дорівнює 1. Значення коефіцієнту згасання по тиску:

$$\delta_p = 5 \frac{N_p}{M} - \text{для сталі}$$

Коефіцієнт послаблення акустичного тракту для найбільшої товщини, $h_2 = 50 \cdot 10^{-3}$ (м) :

$$K_{\text{ат.}} = \frac{S_{\text{ПЕП}}}{2 \cdot \lambda \cdot h_2} T_i \cdot R_p \cdot e^{-2 \cdot \delta_p \cdot h_2} = 0,088 \quad (2.9)$$

2.3 Розрахунок електроакустичного тракту

Електроакустичний тракт – являє собою частину електричної схеми, яка включає в себе електричний бік перетворювача, де відбувається електромеханічне пряме (або зворотне) перетворення.

За допомогою електроакустичного тракту визначається резонансна (робочу) частота випромінювання, форма зондуючого імпульсу і коефіцієнт перетворення електричної енергії в акустичну і навпаки.

За розрахованими значеннями коефіцієнту акустичного тракту можна розрахувати напругу випроміненого та прийнятого сигналів, які задовольняють заданим вимогам.

Напруга сигналу, який випромінюється перетворювачем:

$$U_B = \frac{U_{\text{пр}}}{K_{\text{ат.}} \cdot K_{\text{п.п.}}} \quad (2.10)$$

Скориставшись формулою 2.10, маємо:

| | | | | | | |
|------|-------|-----------|--------|------|--|-------|
| | | | | | | Арк.А |
| Змн. | Арк.А | № докум.№ | Підпис | Дата | | 39 |

$$U_{\text{пр}} = K_{\text{а.т.}} \cdot K_{\text{п.п.}} \cdot U_{\text{в}} \quad (2.11)$$

де $U_{\text{в}}$ – напруга випроміненого сигналу, $K_{\text{п.п.}}$ – коефіцієнт подвійного перетворення (для ЦТС-19 приймаємо $K_{\text{п.п.}} = 0.2$).

Оскільки амплітуда прийнятого сигналу має бути набагато більше рівня шуму, тобто $U_{\text{пр}} \gg U_{\text{шум}}$, задаємося рівнем шуму $U_{\text{шум}} = 10$ (мВ). Тоді:

$$\frac{U_{\text{пр}}}{U_{\text{в}}} > 100$$

$$U_{\text{пр.}} = U_{\text{шум}} \cdot 10 = 1 \text{ (В)} \quad (2.12)$$

Знайдемо мінімальну напругу зонduючого імпульсу:

$$U_{\text{в}} = \frac{U_{\text{пр.}}}{K_{\text{а.т.}} \cdot K_{\text{п.п.}}} = \frac{1}{0.088 \cdot 0.2} = 57 \text{ (В)} \quad (2.13)$$

Приймаємо напругу зонduючого імпульсу на рівні 60 В.

2.4 Розробка та розрахунок функціональної схеми приладу

На основі структурної схеми розробимо функціональну (Рис. 2.3):

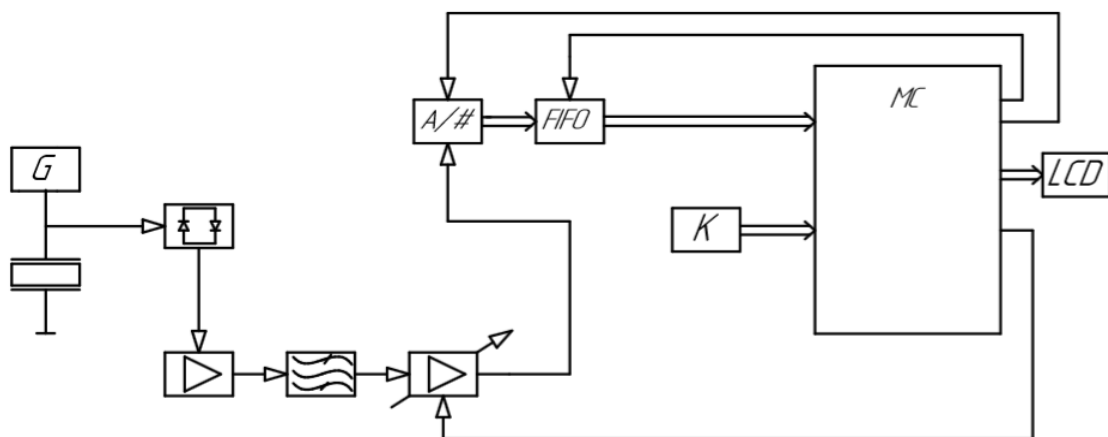


Рис. 2.3 – Функціональна схема

Мікроконтролер виробляє тактові сигнали, які надходячи на вхід генератора зондувальних імпульсів запускають його. Генератор зондувальних імпульсів виробить електричний імпульс з амплітудою $A_{зонд}$, який надійде до ПЕП. За рахунок того, що зворотний п'єзо ефект у первинному перетворювачі виникнуть пружні коливання, які поширяться в об'єкт контролю (ОК). Коливання, відбиті від донної поверхні ОК з амплітудою $A_{дон}$, повернуться до перетворювача. Через прямий п'єзо ефект відбиті коливання перетворяться в електричні імпульси, які потраплять до попереднього підсилювача.

З підсилювача сигнал піде до фільтру, який приглушить шуми і залишається тільки корисний інформативний сигнал. З фільтру сигнал потрапить на АРП який вирівнює по амплітуді донний та зондуєчий сигнал, далі сигнал оцифрується і потрапить спочатку на ОЗП типу FIFO після чого на мікроконтролер і на дисплей.

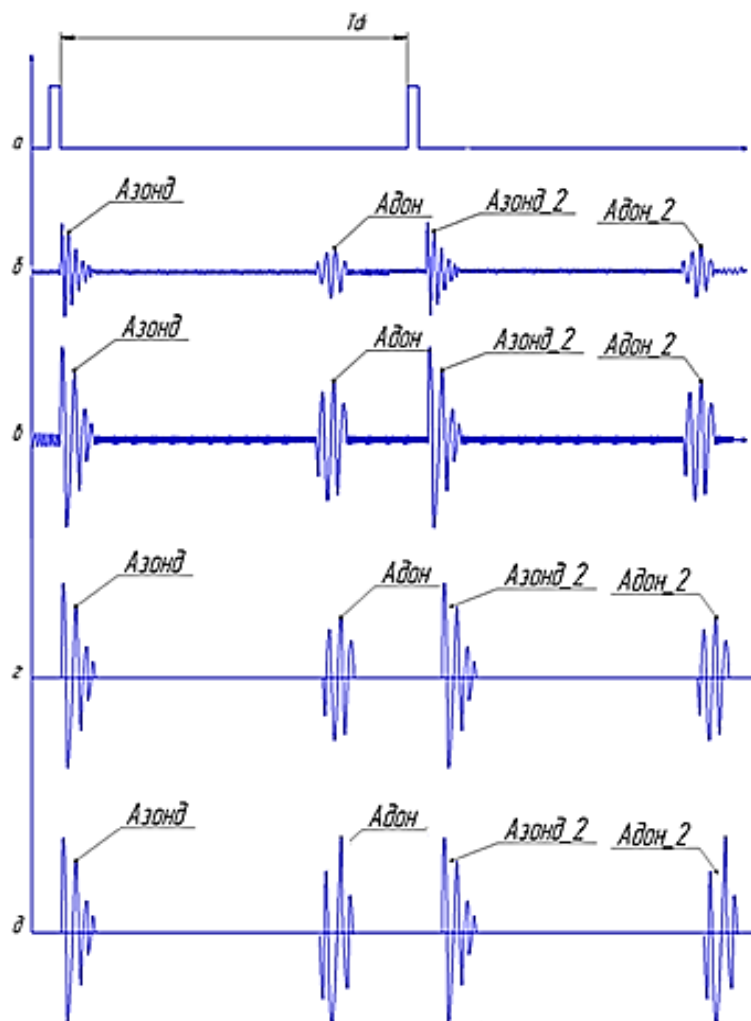


Рис. 2.4. Часова діаграма

2.4.1 Розрахунок генератора зондуєчих імпульсів

Генератор зондуєчих імпульсів (рис. 2.5) служить для збудження п'єзоелемента, який генерує ультразвукові коливання в об'єкт контролю.

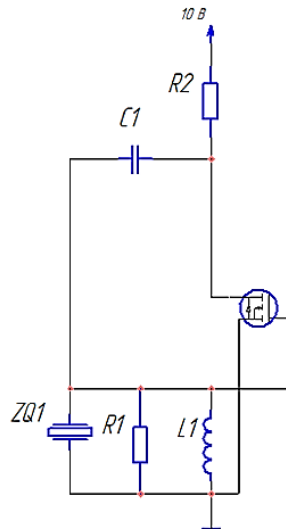


Рис. 2.5. Генератор зондуєчих імпульсів

В даному бакалаврському проекті використовуємо схему ГЗІ з n-канальним DMOS-польовим транзистором в якості ключа – 2N7000. Перевага такої схеми заключається в тому, що польовий транзистор у режимі ключа відкритий рівно на час наявності на його затворі додатної напруги певної величини (для 2N7000 від 3 В),

Розрахуємо напругу, яку необхідно подавати на генератор ударного збудження:

$$U_B \cong 0.4 \cdot E \quad 2.14$$

Тому що частково напруга з конденсатора C_1 перерозподіляється між елементами ланцюга.

$$E = \frac{U_B}{0.4} = \frac{50}{0.4} = 14.2 \text{ (В)} \quad 2.15$$

Період заряду конденсатора C_1 має бути не більшим, ніж період слідування імпульсів збудження, щоб була можливість контролювати ОК на всю глибину.

Час зарядки конденсатора:

| | | | | | | |
|------|-------|-----------|--------|------|--|-------|
| | | | | | | Арк.А |
| Змн. | Арк.А | № докум.№ | Підпис | Дата | | 42 |

$$\tau_{\text{заряд}} \leq 2 \cdot \frac{h_{\text{ок}}}{C_{\text{ок}}} = 2 \cdot \frac{50 \cdot 10^{-3}}{5900} = 16.95 \cdot 10^{-6} (\text{с}) = 16.95 (\text{мкс}) \quad (2.15)$$

Приймаємо: $\tau_{\text{заряд}} = 17 (\text{мкс})$.

Розрахуємо резистор R_2 . Значення ємності C_1 рекомендується приймати $C_1 = 1 \div 10 (\text{нФ})$. Призначимо $C_1 = 4 (\text{нФ})$.

$$R_2 = \frac{\tau_{\text{заряд}}}{3 \cdot C_1} = \frac{12 \cdot 10^{-6}}{3 \cdot 4 \cdot 10^{-9}} = 1.4 \cdot 10^3 (\text{Ом}) = 1.4 (\text{кОм}) \quad (2.16)$$

Повинна виконуватися умова:

$$\tau_{\text{розряд}} \ll \tau_{\text{заряд}}$$

Ємність п'єзоперетворювача розраховується за наступною формулою:

$$C_{\text{ПЕП}} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{\text{цтс}} \cdot \frac{S}{h} = 8.854 \cdot 10^{-12} \cdot 1700 \cdot \frac{18.8 \cdot 10^{-6}}{0.33 \cdot 10^{-3}} = 0.85 (\text{нФ}) \quad (2.17)$$

де $\varepsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} (\text{Ф/м})$ – електрична постійна; $\varepsilon_{\text{цтс}}$ – відносна діелектрична постійна (для ЦТС-19 $\varepsilon_{\text{цтс}} = 1700$); S – площа поверхні дискового перетворювача; h – товщина перетворювача.

Тоді загальна ємність:

$$C_{\text{зар}} = \frac{C_1 \cdot C_{\text{пеп}}}{C_1 + C_{\text{пеп}}} = \frac{4 \cdot 0.72}{4 + 0.72} = 0.7 (\text{нФ}) \quad (2.18)$$

| | | | | |
|--|---------------------|-----|-------------|-----|
| Gate Threshold Voltage ($V_{\text{DS}} = V_{\text{GS}}, I_{\text{D}} = 1.0 \text{ mAdc}$) | $V_{\text{GS(th)}}$ | 0.8 | 3.0 | Vdc |
| Static Drain-Source On-Resistance ($V_{\text{GS}} = 10 \text{ Vdc}, I_{\text{D}} = 0.5 \text{ Adc}$) ($V_{\text{GS}} = 4.5 \text{ Vdc}, I_{\text{D}} = 75 \text{ mAdc}$) | $r_{\text{DS(on)}}$ | — | 5.0 6.0 | Ohm |
| Drain-Source On-Voltage ($V_{\text{GS}} = 10 \text{ Vdc}, I_{\text{D}} = 0.5 \text{ Adc}$) ($V_{\text{GS}} = 4.5 \text{ Vdc}, I_{\text{D}} = 75 \text{ mAdc}$) | $V_{\text{DS(on)}}$ | — | 2.5 0.45 | Vdc |

Рис. 2.6. Даташит транзистора

Опір транзистора у відкритому стані 5 (Ом) (Рис.2.9), тоді:

$$\tau_{\text{розряд}} = C_{\text{зар}} \cdot R_{\text{VT1}} = 0.7 \cdot 10^{-9} \cdot 5 = 3.5 \cdot 10^{-9} (\text{с}) = 3.5 (\text{нс}), \quad (2.19)$$

| | | | | | |
|------|-------|-----------|--------|------|-------|
| | | | | | Арк.А |
| Змн. | Арк.А | № докум.№ | Підпис | Дата | 43 |

що цілком задовольняє умову (2.17).

Робоча частота ПЕП 5 МГц і дорівнює:

$$f_p \approx \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_1 \cdot C_{\text{ПЕП}}}} \quad (2.20)$$

Виражаємо індуктивність котушки L_1 для заданої частоти:

$$L_1 = \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot f_p^2 \cdot C_{\text{ПЕП}}} = \frac{1}{4 \cdot 9.8596 \cdot 25^{12} \cdot 0.85 \cdot 10^{-9}} = 1.7 \text{ (мкГн)} \quad (2.21)$$

Тривалість імпульсу збудження ПЕП має дорівнювати частоті коливання перетворювача:

$$\tau_{\text{зі}} = \frac{1}{2 \cdot f_p} = \frac{1}{2 \cdot 5 \cdot 10^6} = 0.1 \cdot 10^{-6} \text{ (с)} \quad (2.22)$$

2.4.2 Розрахунок схеми захисту

Діодний обмежувач (рис 2.7) необхідний в даній схемі оскільки напруга при ударному збудженні перетворювача може бути занадто високою. Діоди VD1, VD2 обираємо – 1N4148.

Параметри діодів: прямий струм - $I \geq 150$ (мА), $I_{\text{max}} \leq 450$ (мА), зворотня напруга – 100 (В) швидкість переключення ≤ 4 (нс). Резистор перед діодним обмежувачем необхідний для обмеження вхідного струму (2.23):

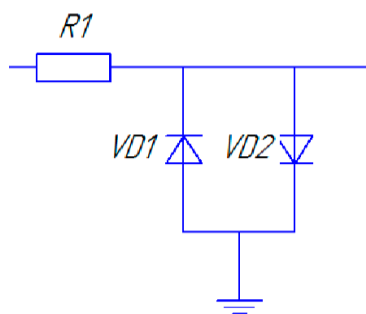


Рис. 2.7. Діодний обмежувач

| | | | | | |
|------|-------|-----------|--------|------|-------|
| | | | | | Арк.А |
| Змн. | Арк.А | № докум.№ | Підпис | Дата | 44 |

$$R_1 = \frac{U_{\text{вип.мах}}}{I_{\text{мах}}} \quad (2.23)$$

де $I_{\text{мах}}$ – максимальний струм, що можуть пропустити діоди; $U_{\text{вип.мах}}$ – розрахуємо з формули (2.24)

$$U_{\text{вип.мах}} = 0.3 \cdot h \cdot E \quad (2.24)$$

де h – товщина п'єзоперетворювача, E – для ЦТС-19 дорівнює 3000 (В/мм)

$$U_{\text{вип.мах}} = 0.3 \cdot 0.33 \cdot 3000 = 297(\text{В}) \quad (2.24)$$

Розрахуємо R_1 :

$$R_1 = \frac{297}{0.45} = 660 (\text{Ом}) = 0.66 (\text{кОм}) \quad (2.23)$$

Використовуємо два однакові діоди 1N4148.

2.4.3 Розрахунок операційного підсилювача

Для того, щоб підсилити прийнятий сигнал використаємо підсилювач на базі операційного підсилювача AD8051 (рис. 2.8).

Необхідно підсилити вхідну напругу, до 1В. Працювати даний операційний підсилювач буде в діапазоні від -5В до 5В.

Максимальний коефіцієнт підсилення для $U_{\text{пр}}$ для даного підсилювача:

$$K = \frac{U_{\text{мах}}}{U_{\text{пр}}} = \frac{3}{1} = 3 \quad (2.24)$$

$U_{\text{мах}}$ – максимальна напруга яку повинні отримати на виході ОП.

Приймаємо $K = 3$.

Розрахуємо напругу, яка буде на вихід ОП, для $U_{\text{пр}}$.

| | | | | | | |
|------|-------|-----------|--------|------|--|-------|
| | | | | | | Арк.А |
| Змн. | Арк.А | № докум.№ | Підпис | Дата | | 45 |

$$U_{\text{підс}} = K \cdot U, \quad (2.25)$$

де K – коефіцієнт підсилення;

U – напруга яка поступає на вхід ОП.

$$U_{\text{підс}} = 3 \cdot 1 = 3 \text{ (В)} \quad (2.26)$$

Амплітуда сигналу після підсилення входить в діапазон роботи підсилювача.

За такого коефіцієнта підсилення буде достатньо використати 1 каскад підсилення. На виході підсилювача отримаємо сигнал підсилений у 100 разів.

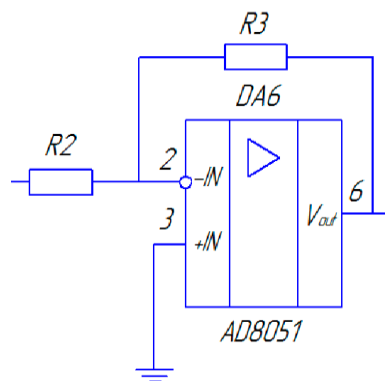


Рис. 2.8. Підсилювач на базі ОП AD8051

Резистори визначають коефіцієнт підсилення:

$$K_U = \frac{R_3}{R_2}, \quad (2.27)$$

де K_U – коефіцієнт підсилення.

Підбираємо $R_3 = 3,3$ (кОм), $R_2 = 1$ (кОм).

2.4.4 Розрахунок смугового фільтра

Смуговий фільтр використовують для того, щоб виключити сигнали завад, він фільтрує усі зайві частотні гармоніки, що не входять в інформаційний сигнал. Визначимо частотну характеристику прийнятого сигналу з п'єзоперетворювача, для того щоб з'ясувати смугу пропускання фільтра.

| | | | | | | |
|------|-------|-----------|--------|------|--|-------|
| | | | | | | Арк.А |
| Змн. | Арк.А | № докум.№ | Підпис | Дата | | 46 |

Модель луна-імпульсного сигналу:

$$U(t) = A \cdot e^{-(g \cdot w \cdot t)^2} \cdot \sin(w \cdot t)$$

де A – амплітуда прийнятого сигналу; g – коефіцієнт швидкості затухання; w – частота перетворювача.

Змодельований даний сигнал в програмному середовищі Matlab (рис. 2.9)

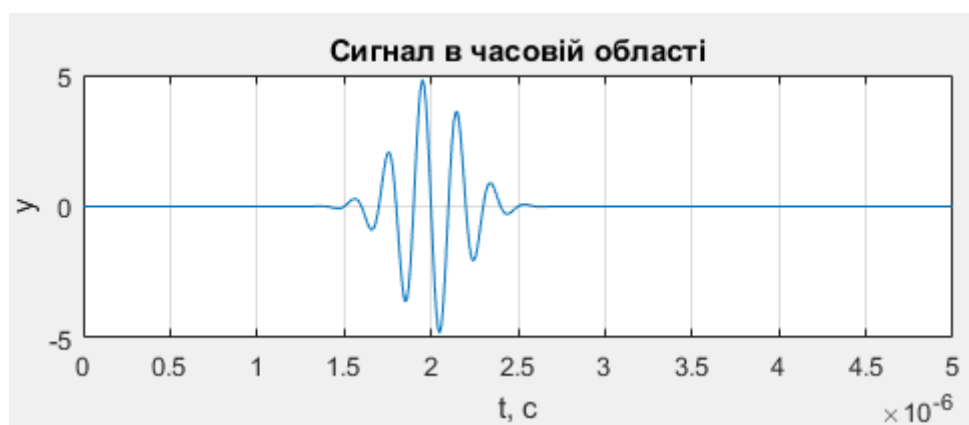


Рис. 2.9. Вигляд змодельованого сигналу луна-імпульсу для $A=4$, (4 коливання):
по вісі абсцис – час, по вісі ординат – амплітуда

Визначити смугу пропускання фільтру, для цього побудували частотну характеристику заданого сигналу, полосу пропускання визначимо з діапазону частот на рівні -20 дБ.



Рис. 2.10. Нормований спектр луна-імпульсного сигналу

З рис. 2.13 випливає, що смуга пропускання фільтра дорівнює від 3.2 МГц до 6.8 МГц, тобто 3.6 МГц. Спроекуємо фільтр за допомогою FilterPro фірми Texas Instruments (рис. 2.11).

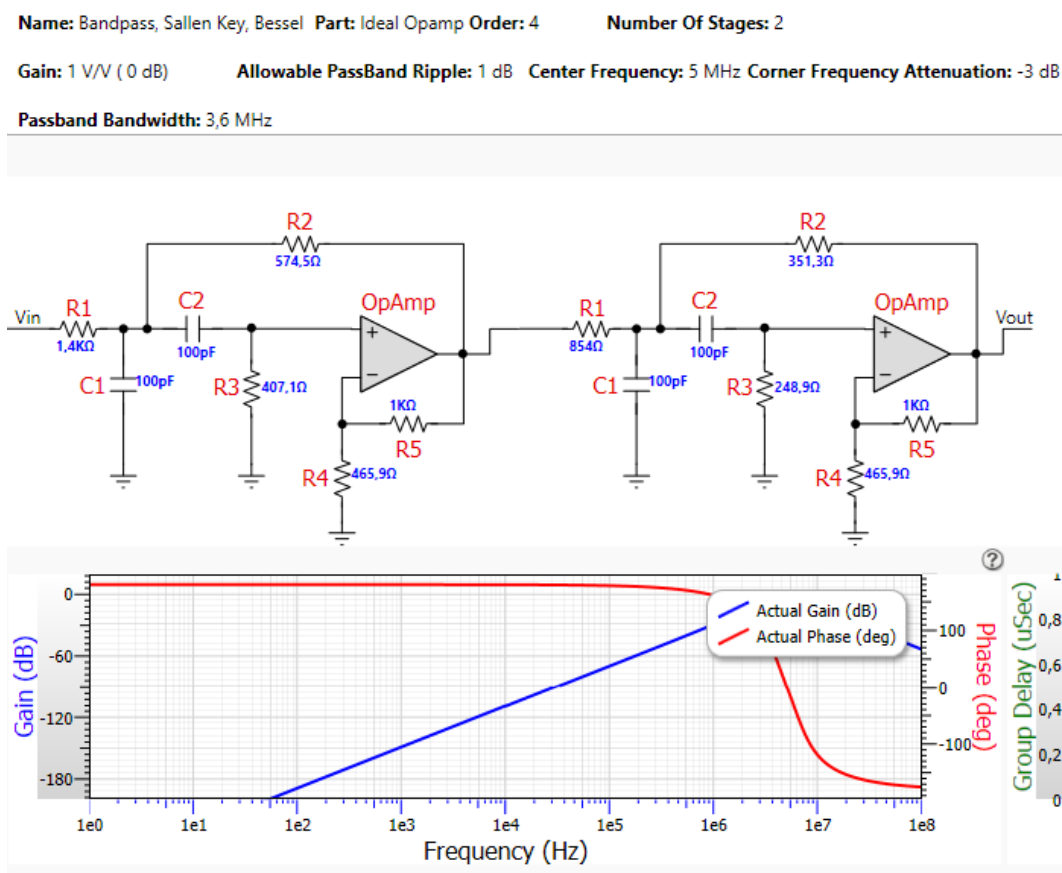


Рис. 2.11 – Змодельований двокаскадний смуговий фільтр

2.4.5 Вибір автоматичного регулювання підсилення

Автоматичне регулювання підсилення – це система, яка автоматично регулює підсилення приймача електричних коливань у випадку, коли змінюється напруга сигналу на його вході. Найчастіше напруга сигналів, що приходять на вхід приймача, значно змінюється через розходження потужностей передавачі відстаней їх від місця прийому, завмирань сигналів при розповсюдженні, різкої зміни відстаней і умов прийому між передавачем і приймачем, встановленими на рухомих об'єктах (літаках, автомобілях і т.д.), та інших причин. Такі зміни

спричиняють неприпустимі коливання або спотворення сигналів в приймачі. АРП працює на зменшення змін напруги вихідних сигналів в порівнянні з вхідними.

Підсилювач з АРП автоматично підбирає коефіцієнт передачі таким чином, щоб підтримувати певне усереднене значення вихідної змінної напруги. Зазвичай перетворювачі виконуються за допомогою випрямляча, але також можна використовувати піковий детектор щоб отримати постійну напругу, що змінюється відповідно до зміни вхідного сигналу. Вихідна напруга інтегратора змінює коефіцієнт підсилення до того часу, поки вихідна напруга перетворювача змінного струму в постійний не стане рівна заданому рівню.

В даній дипломній роботі використано схему АРП на базі мікросхеми AD8367.

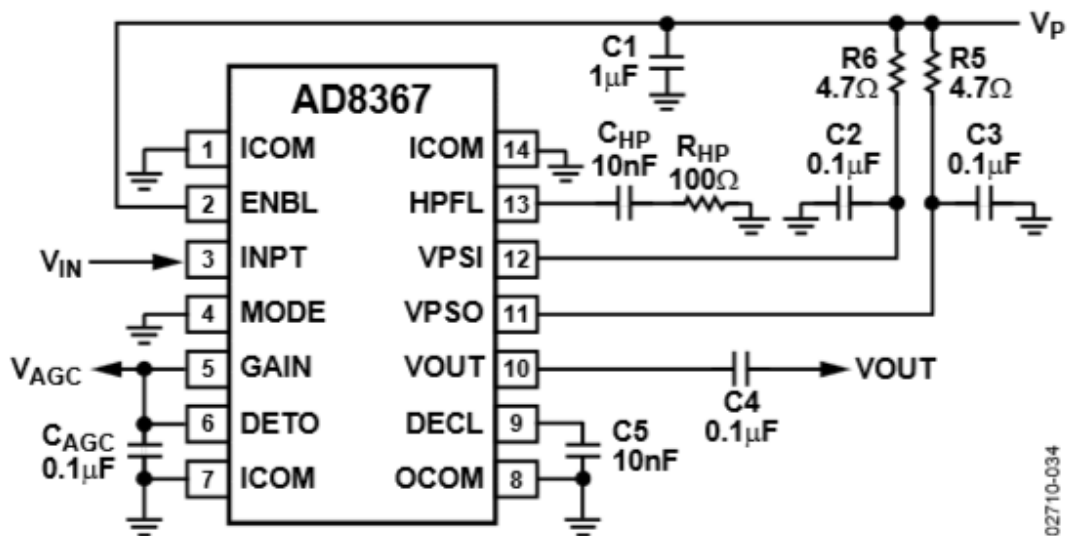


Рис. 2.12 – Схема підключення АРП

2.4.6 Розрахунок та вибір АЦП

Виберемо АЦП за допомогою таких умов:

А) Необхідно, щоб частота дискретизації була як мінімум у 2 рази вищою за максимальну частоту вхідного сигналу;

Б) Розрядність та частота дискретизації АЦП має задовольняти вимоги точності;

В) Вхідний сигнал має знаходитися в межах динамічного діапазону.

Розрахуємо мінімальне значення сигналу на вході АЦП з урахуванням коефіцієнта підсилення. $x_{min} = 1\text{мВ}$, $K_{\Pi} = 3$:

$$X_{min} = x_{min} * K_{\Pi} = 3 \cdot 1 = 3\text{ В} \quad (2.28)$$

Розрахуємо частоту дискретизації з урахуванням похибки яка повинна не перевищувати $\delta_{xm} = 2\%$. Таким чином, на один період прийнятого сигналу потрібно здійснити 250 вибірок за частоти прийнятого сигналу на рівні 5 МГц :

$$\frac{f_c}{f_d} < \delta_{xm} \Rightarrow f_d > \frac{f_c}{\delta_{xm}} \quad (2.29)$$

$$f_d > \frac{5 * 10^6}{0.02} \Rightarrow f_d > 250 \text{ (МГц)} \quad (2.30)$$

Отже, необхідно обрати частоту дискретизації $f_d \geq 250$ (МГц). Розрядність обираємо 10 біт. Згідно розрахунків обираємо АЦП MAX1124 з частотою дискретизації 250 МГц.

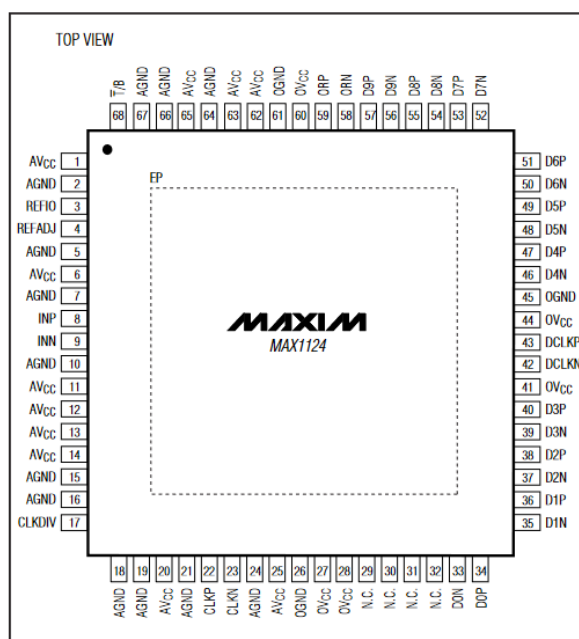


Рис. 2.13 Зовнішній вигляд мікросхеми АЦП

2.4.7 Розрахунок та вибір пам'яті

Визначною особливістю пам'яті FIFO в порівнянні зі звичайною пам'яттю RAM або ROM є відсутність адресних ліній. Стандартна архітектура FIFO має вигляд масиву RAM ARRAY з покажчиками початку, які переміщуються при зчитуванні й запису (READ POINTER) і кінці (WRITE POINTER) вільного простору пам'яті (рис.2.13).

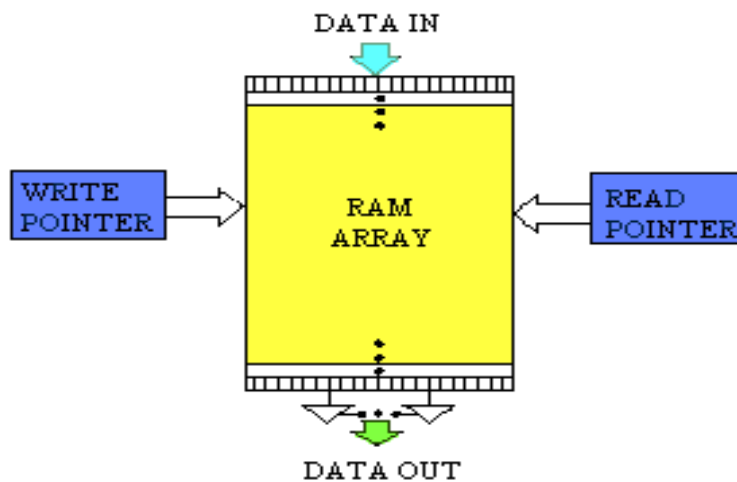


Рис. 2.14. Базова архітектура пам'яті FIFO

Додаткова властивість пам'яті FIFO це наявність окремого порту для читання і окремого порту для запису даних. Завдяки наявності покажчиків і двухпортової структури пам'яті FIFO, строби зчитування і запису даних можуть надходити на однойменні входи пам'яті в довільному порядку. У випадку, коли в пам'яті RAM операції читання і запису даних виконують строго послідовно в часі, то в пам'яті FIFO можна виконувати запис і читання в незалежних одна від одної асинхронних режимах.

Визначимо час затримки між зондувальним і донним імпульсами :

$$h_{ок} = \frac{C_{ок} \cdot \tau}{2} \quad (2.31)$$

Виразимо час затримки τ :

$$\tau = \frac{2 \cdot h_{ок}}{C_{ок}} = \frac{2 \cdot 50 \cdot 10^{-3}}{5900} = 16.9 \cdot 10^{-6} \text{ (с)} = 17 \text{ (мкс)} \quad (2.32)$$

| | | | | | | | | | |
|------|-------|-----------|--------|------|--|--|--|--|-------|
| | | | | | | | | | Арк.А |
| Змн. | Арк.А | № докум.№ | Підпис | Дата | | | | | 51 |

Розрахуємо кількість вибірок $f_{\text{ацп}} = 250 \cdot 10^6$ Гц :

$$N_{\text{в}} = \frac{\tau}{T_{\text{ацп}}} = \tau \cdot f_{\text{ацп}} = 17 \cdot 10^{-6} \cdot 250 \cdot 10^6 = 4250 \quad (2.33)$$

Тоді розрахуємо об'єм даних:

$$\Delta(\text{б}) = 4250 \cdot 10 = 42500 \text{ біт} = 5313 \text{ байт} \quad (2.34)$$

Приймаємо $\Delta(\text{б}) = 128 \text{ Кб}$

Вибрана мікросхема CY7C4285V (рис.2.15)

Основні характеристики мікросхеми:

- Напруга живлення 3.3 (В);
- Об'єм пам'яті 128 Кб;
- Високошвидкісна, малопотужна, FIFO пам'ять;
- 0,35-мкм CMOS для оптимальної швидкості та потужності;
- Висока швидкість роботи: 100 МГц (10 нс час читання/цикл запису).

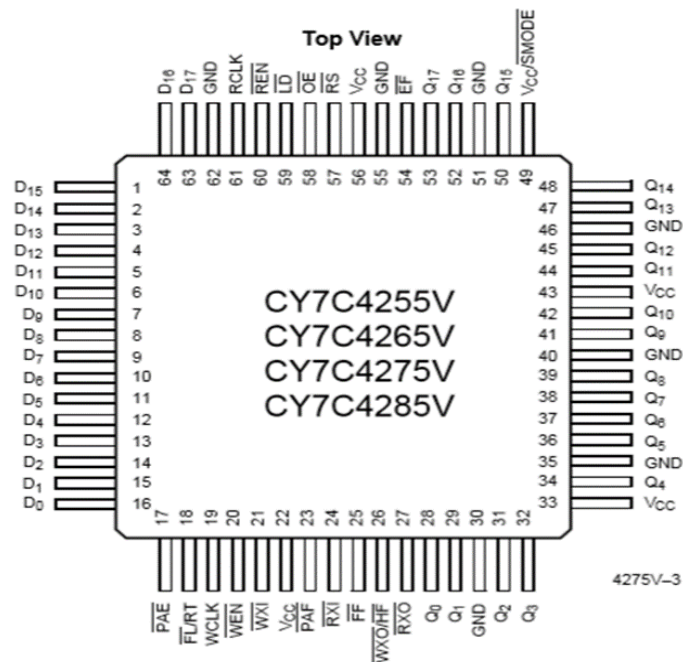


Рис. 2.15. FIFO зовнішній вигляд мікросхеми

2.4.8 Вибір мікроконтролера

Мікроконтролер – це спеціалізована мікропроцесорна система, яка має вигляд мікросхеми, що включає мікропроцесор, блоки пам'яті для збереження коду програм і даних, порти вводу-виводу і блоки зі спеціальними функціями (лічильники, компаратори, АЦП та інші).

STM32H7 контролери побудовані на базі ядра Cortex-M7 (ARM7M) і працюють на частоті до 550 МГц. Cortex-M7 - це процесор, який дозволяє створювати портативні пристрої, медичне обладнання, прилади для промислового управління, а також пристрої з високою обчислювальною навантаженням.

Вбудований в ядро Cortex-M7 системний таймер дозволяє створювати додатки, які можна легко переносити з однієї апаратної платформи на іншу (якщо та теж побудована на контролері з Cortex-M7). Така функція особливо актуальна, коли стоїть задача використання операційної системи реального часу. Вбудованим також є контролер переривань, який є стандартним модулем процесора і не змінюється у різних виробників мікросхем.

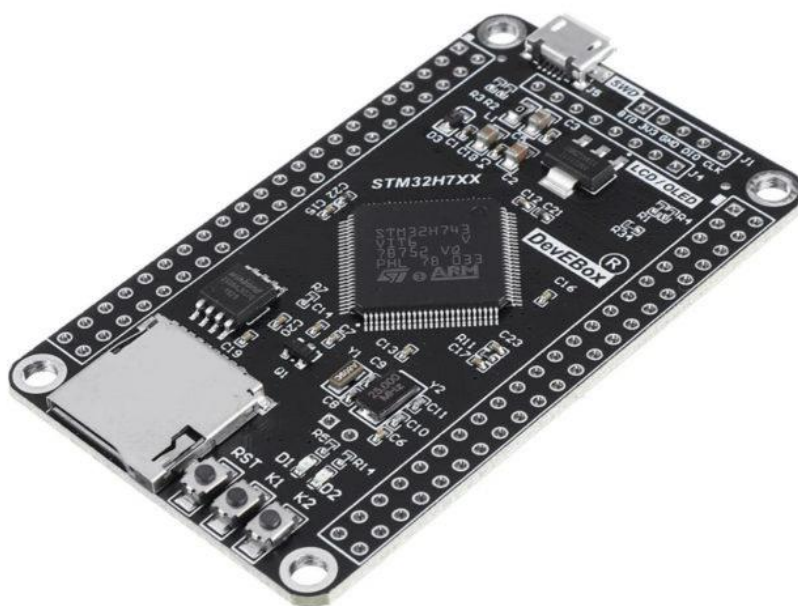


Рис.2.16 Зовнішній вигляд плати на базі мікроконтролера STM32H7

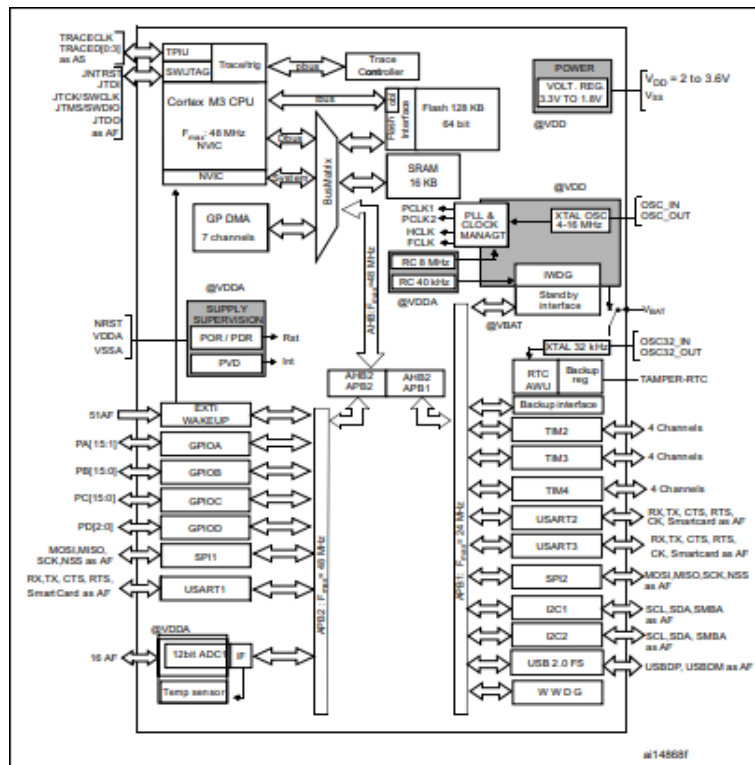


Рис. 2.17 Внутрішня структура STM32

2.4.9 Вибір дисплея

Для зображення отриманих результатів контролю та вимірної величини необхідно вибрати дисплей, в даному проекті ми будемо використовувати рідкокристалічний дисплей LCD 1602 (Рис. 2.18)



Рис. 2.18 – Модуль LCD 1602

- Характеристики:
- Розміри: 80 x 36 мм
- Робоча: температура 0 ~ 50 ° C
- Підсвічування: зелений

- Розмір символу: 4.35 x 2.95мм
- Формат: 16 x 2
- Розміри точки: 0.5 x 0.5мм
- Інтерфейс: HD44780
- Видима область: 64.5 x 13.8мм
- Живлення: 5В

2.4.10 Вибір кнопок

Щоб керувати приладом додаймо потрібні кнопки, найкраще підійде матриця з тактових кнопок 0650НІМ-130G-G 4x4 (Рис. 2.19).



Рис. 2.19 Кнопка 0650НІМ-130G-G 4x4

| | | | | | | |
|------|-------|-----------|--------|------|--|-------|
| | | | | | | Арк.А |
| Змн. | Арк.А | № докум.№ | Підпис | Дата | | 55 |

3. РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ПЕРЕТВОРЮВАЧА

3.1. Технологія виготовлення перетворювача

П'єзокерамічні елементи для частоти вище за 2 МГц, як правило, мають товщину менше 1 мм, а для частот вище 20МГц виготовити перетворювачі за звичайною технологією досить складно. Керамічні заготовки малої товщини не мають достатньої міцності і, як правило, ушкоджуються при маніпуляціях, пов'язаних з поляризацією і виготовленням самої конструкції шукача [1].

Поляризовану заготовку розпилюють на пластини заданої товщини уздовж на-пряму поляризації. Тепер на поверхні пластини наносяться нові електроди, що використовуються для збудження електричного поля, а первинні електроди знімаються.

Слід зазначити, що для отримання поперечного п'єзоефекта наносять два типи електродів. Перші електроди, нанесені методом впалювання срібної пасти, необхідні для проведення поляризації. Потім срібні електроди видаляють і наносять вторинні електроди на інші дві поверхні п'єзоелемента. Ці електроди необхідні для створення збуджуючого поля і, крім того, для контакту з іншими поверхнями. Для їх нанесення не може бути використаний метод впалювання срібної пасти при температурі 800°C, оскільки це викличе деполяризацію п'єзоелементів.

Нанесення вторинних електродів може проводитися розпиленням металевого срібла у вакуумі, ультразвуковим лудінням і хімічним покриттям. Нанесені методом вакуумного розпилення електроди мають незначну міцність зчеплення з керамікою, і тому неможливо проводити їх пайку. Застосовують також хімічне нікелювання, що полягає у відновленні нікелевих солей на поверхні кераміки за допомогою гіпофосфата натрію або калію, і індіювання, що полягає в гальванічному покритті кераміки індієм.

| | | | | | | |
|------|-------|-----------|--------|------|--|-------|
| | | | | | | Арк.А |
| Змн. | Арк.А | № докум.№ | Підпис | Дата | | 56 |

Метод ультразвукового контролю, конфігурація ОК, умови контролю тощо. істотно впливають на вибір конструкцій п'єзоперетворювачів. Тому вони мають багато різновидів. Проте принципи, покладені в основу створення конструкцій перетворювачів, зберігаються для всіх типів перетворювачів [17].

Прямими перетворювачами називають такі перетворювачі, які забезпечують випромінювання в ОК і прийом пружних хвиль під прямим кутом до поверхні виробу, що знаходиться у контакті з перетворювачем. Прямий суміщений перетворювач зображено на рисунку 3.1, він обов'язково містить такі конструктивні елементи як корпус, протектор, п'єзопластина, демпфер.

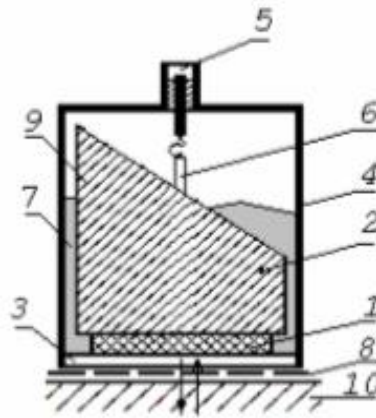


Рис. 3.1. Будова прямого суміщеного перетворювача:

- 1- п'єзоелемент, 2-демпфер, 3-протектор (захисне донце), 4-корпус, 5- електричний з'єднувач, 6-струмопідвід, 7-заливальний компаунд, 8- контактний шар (рідина), 9-акустична пастка, 10-ОК

Корпус ПЕП зазвичай виготовляється з металу, або діелектрика. П'єзопластина, протектор і демпфер являють собою акустичний вузол, який закріплюється в корпусі за допомогою заливки спеціальної речовини. Спочатку припаюються дроти, через які підводиться електрична напруга до п'єзоелемента. Найчастіше після установки в корпус провідники виводять на роз'єм типу Lemo або інші.

Складати резонатор починають з підготовки п'єзоелемента. Зазвичай використовують п'єзоелементи, що випускаються серійно. П'єзоелементи поляризовані і покриті електродами, напрямок поляризації помічається на електроді.

Розміри в поперечних напрямках, вибирають такими, щоб інтервали часу пробігу УЗ поздовжніх хвиль по товщині і ширина п'єзоелемента значно розрізнялися. Поперечні розміри п'єзоелемента повинні бути багато більше його товщини. При контролі малогабаритних виробів ці умови в перетворювачах порушуються. Прагнення підвищити продуктивність контролю приводить до збільшення поперечних розмірів п'єзоелемента, що часто входить в суперечність з електричними характеристиками навантажень генератора.

Поперечні розміри п'єзоелемента доводиться вибирати достатньо великими для створення вузькодіаграмних перетворювачів, призначених для виявлення далеко розташованих відбивачів. В цьому випадку або використовують генератори з поліпшеними характеристиками навантажень, або п'єзоелемент виготовляють у вигляді мозаїки, в якій окремі частини електрично сполучають послідовно, для того, щоб сумарна ємність забезпечувала нормальну роботу генератора (тут доводиться шукати компроміс між зменшенням напруженості електричного поля в кожному елементі за рахунок послідовного з'єднання окремих частин і зменшенням сумарної ємності для поліпшення роботи електричного генератора). На жаль, характеристики акустичного поля мозаїчних п'єзоелементів значною мірою неоднорідні в поперечному перетині через вплив місць з'єднання окремих елементів.

Електроди на поверхню п'єзокераміки наносять випалюванням. Для цього пластину миють в розчині соди або в спирті, потім сушать при температурі 600°C протягом 2г. Срібну пасту наносять на поверхню пензликом дуже тонким шаром. Пасті дають висохнути при температурі 60-80°C. Поляризацію пластин з ЦТС проводять у ванні з трансформаторним маслом або силікатною рідиною. До електродів пластини припаюють провідники.

| | | | | | | |
|------|-------|-----------|--------|------|--|-------|
| | | | | | | Арк.А |
| Змн. | Арк.А | № докум.№ | Підпис | Дата | | 58 |

Щоб виконати це завдання паяння виконують електропаяльником з жалом з мідного дроту діаметром 1-2 мм зі скошеним торцем. Температура нагріву не повинна перевищувати 100°C. Застосовують легкоплавкі припої (сплав Вуда або Луповца), що мають малу усадку при твердінні. Наступним етапом складання акустичного вузла є клейове з'єднання п'єзоелемента з іншими елементами конструкції - протектором і демпфером.

Вже склеєний резонатор розміщують в корпусі перетворювача і фіксують за допомогою заливки спеціальною фіксуючою речовиною. Потім виконують останню технологічну операцію - притирають протектор, тобто забезпечують площинності його поверхні, зверненої до ОК.

На тильній стороні п'єзоелемента розташовується демпфер, який знаходиться в акустичному контакті з п'єзоелементом. Основне призначення демпфера - це гасіння коливань пластини по товщині, тобто зменшення механічної добротності п'єзорезонатора. Зменшення добротності п'єзорезонатора приводить до скорочення часу вільних коливань п'єзоелемента і, природно, до скорочення тривалості зондуючого імпульсу (розширенню смуги частот). Крім того демпфер одночасно служить утримувачем для п'єзоелемента і додає йому необхідну стійкість проти навантажень на стиснення і на удар, виникаючих при створенні акустичного контакту з об'єктом контролю.

П'єзоелемент приклеюється до демпфера шаром епоксидного клею товщиною менш 20/λ. Демпфер повинен мати надійний акустичний контакт з п'єзоелементом по всій тильній його поверхні. Міцність приклеєного до демпфера перетворювача істотно підвищується.

Імпеданс демпфера вибирають відповідно до бажаного демпфування п'єзоелемента. Найвище демпфування відбувається, коли імпеданс демпфера і п'єзоелемента співпадають, коли вся акустична енергія від тильної стінки п'єзоелемента переходить без віддзеркалення в демпфер. Демпфер повинен за можливості повністю поглинути цю енергію, щоб в демпфері не наступив резонанс.

| | | | | | | | | | |
|------|-------|-----------|--------|------|--|--|--|--|-------|
| | | | | | | | | | Арк.А |
| Змн. | Арк.А | № докум.№ | Підпис | Дата | | | | | 59 |

3.2. Розробка моделі перетворювача

Згідно з розробленою конструкцією в програмному середовищі SolidWorks було промодельовано прямий суміщений перетворювач (рис. 3.2), розрахунки якого проводились в п. 2.1.

Модель була виконана наступним чином: спочатку були промодельовані всі елементи датчика як окремі частини, а потім з'єднані взаємозв'язками в одну конструкцію датчика. Створена конструкція повністю відповідає класичній схемі, показаній на рис. 3.1 та описаній у попередньому підрозділі.

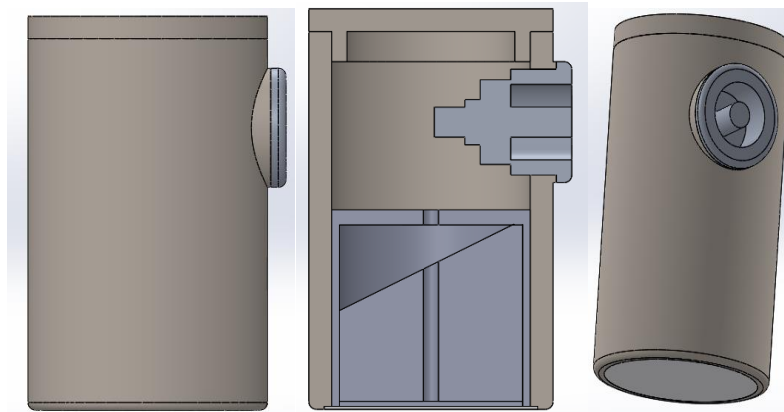


Рис. 3.2. 3D Модель суміщеного перетворювача

| | | | | | | |
|------|-------|-----------|--------|------|--|-------|
| | | | | | | Арк.А |
| Змн. | Арк.А | № докум.№ | Підпис | Дата | | 60 |

4. РОЗРАХУНОК ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ

За вихідними даними дипломного проекту, похибка повинна не перевищувати 2%.

4.1 Похибка формування вимірювального інтервалу часу

В імпульсних дефектоскопів всі вимірювальні операції здійснюються над відеоімпульсами, проте в ультразвуковій товщинометрії вимірювальні операції проводять, як правило, над радіоімпульсами. Саме тому, в залежності від амплітуди сигналу і положення порогового рівня, відлік часового інтервалу може дискретно зміститися на цілий період несучої частоти.

Сумарна абсолютна похибка формування вимірювального інтервалу складає:
 $\Delta\tau_1 = \pm|x_1 - x_2| \cdot T$ і за певних умов може бути доведена до нуля.

$$\Delta\tau_1 \leq \pm x \cdot T \quad (4.1)$$

де x – визначено за більшим із значень x_1 або x_2

Щоб x до значення 0.005 є можливість провести певні дії до обробки сигналу.

В цьому випадку мінімальна похибка формування інтервалу буде:

$$\Delta\tau_1 \leq \pm 0.005 \cdot T = \pm \frac{0.005}{5 \cdot 10^6} = 1 \cdot 10^{-9} \text{ (с)} \quad (4.2)$$

Відносна похибка формування інтервалу часу:

$$\Delta_1 = \frac{\Delta\tau_1}{\tau_{i.зб.}} \cdot 100\% = \frac{1 \cdot 10^{-9}}{17 \cdot 10^{-6}} \cdot 100\% = 0.005\% \quad (4.3)$$

4.2 Похибка проходження через контактну рідину

У випадку, коли час проходження ультразвукового сигналу через шар рідини входить у вимірювальний інтервал, сам вимірювальний інтервал збільшиться на величину:

| | | | | | | |
|------|-------|-----------|--------|------|--|-------|
| | | | | | | Арк.А |
| | | | | | | 61 |
| Змн. | Арк.А | № докум.№ | Підпис | Дата | | |

$$\Delta\tau_2 = 2 \cdot \frac{h_p}{C_p} = 2 \cdot \frac{0.1 \cdot 10^{-3}}{1500} = 0.13 \cdot 10^{-6} \text{ (с)} \quad (4.4)$$

де C_p – швидкість звуку в контактній рідині (вода); h_p – товщина шару контактної рідини

Відносна похибка за рахунок проходження через контактну рідину:

$$\Delta_2 = \frac{\Delta\tau_2}{\tau_{\text{вим}}} \cdot 100\% = \frac{0.13 \cdot 10^{-6}}{17 \cdot 10^{-6}} \cdot 100\% = 0.76\% \quad (4.5)$$

4.3 Похибка квантування АЦП

Похибка квантування АЦП визначається наступною формолою

$$\Delta_{\text{кв.АЦП}} = \frac{U_{\text{max}}}{2^N} * 100\% = \frac{3.3}{2^{12}} * 100 = 0.08\% \quad (4.6)$$

4.4 Похибка підсилювача

Розрахуємо відносну похибку підсилювача:

$$\delta_M = \frac{\delta_k}{1 + K \cdot \frac{R1}{R1 + R2}} \quad (4.7)$$

δ_k – мультиплікативна похибка яка залежить від величини, що вимірюється (0,1%).

$$\delta_M = \frac{0.1}{1 + K \cdot \frac{R1}{R1 + R2}} = \frac{0.1}{1 + 100 \cdot \frac{100}{101}} = 0.001\% \quad (4.8)$$

4.5 Загальна похибка

Розрахуємо сумарну відносну похибку:

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 + \delta_M + \Delta_{\text{кв.АЦП}} = 0.76\% \quad (4.9)$$

Отже, в роботі дотримується необхідна точність вимірювання, оскільки розраховані значення похибки менші, ніж дані за технічним завданням.

| | | | | | | |
|------|-------|-----------|--------|------|--|-------|
| | | | | | | Арк.А |
| Змн. | Арк.А | № докум.№ | Підпис | Дата | | 62 |

ВИСНОВКИ

У першому розділі дипломної роботи було проведено аналітичний огляд, в якому розглянуто об'єкт контролю. Аналіз методів неруйнівного контролю сталі, їх переваги та недоліки. Запропонований ультразвуковий луна-імпульсний метод як один з найкращих. Обрано структурна схему і розроблено функціональну.

В другому розділі дипломної роботи було розраховано прямий суміщений п'єзоелектричний перетворювач, акустичний і електроакустичний тракт. Розраховані і узгодженні всі вузли функціональної схеми. Відповідно до розрахунків і актуальності технологій були підібрані електричні компоненти. Розроблена електрична принципова схема приладу.

У третьому розділі було проведено огляд технології виготовлення прямого суміщеного п'єзоперетворювача. А також створення його 3D моделі в програмному середовищі SolidWorks.

За вимогою технічного завдання похибка приладу повинна не перевищувати 2%. В четвертому розділі дипломної роботи були проведені розрахунки похибок: формування вимірювального інтервалу, проходження через контактну рідину. Визначена загальна похибка як сума похибок перерахованих вище не перевищує значення похибки яка вимагається.

| | | | | | | |
|------|-------|-----------|--------|------|--|-------|
| | | | | | | Арк.А |
| Змн. | Арк.А | № докум.№ | Підпис | Дата | | 63 |

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Цапенко В. К. Основы ультразвукового неруйнівного контролю: Підручник/ Цапенко В. К., Куц Ю. В. – К.:НТУУ «КПІ», 2010. – 448 с.
2. Цапенко В.К. Акустичні перетворювачі: Методичні вказівки / Уклад.: Цапенко В.К. – Київ, 2004.- 86с.
3. Галаган Р. М. Теоретичні основи ультразвукового неруйнівного контролю: підручник / Р. М. Галаган. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 263
4. Крауткремер Й., Крауткремер Г. Ультразвуковой контроль материалов. Справочник. - М.: Металлургия, 1991. - 752 с.
5. Зацепин А.Ф. Введение в физику акустического контроля / А.Ф. Зацепин. – Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2005. – 88 с.
6. Макарин, В. С. Средства неразрушающего контроля отливок : Учеб. пос. для СПТУ / В. С. Макарин. – М. : Высшая школа, 1988. – 72 с.
7. Каневский И.Н., Сальникова Е.Н. Неразрушающие методы контроля: Учебное пособие. - Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. - 243 с
8. Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн. 2. Акустические Н44 методы контроля: Практ. Пособие / И.Н. Ермолов, Н.П. Алешин, А.И. Потапов; Под ред. В.В. Сухорукова.-- М.: Высш. шк, 1991.--'283 с
9. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: Справ./ Под общ. ред. В. В. Ключева. – М.: Машиностроение, 1986. – 352 с.: ил
- 10.Сергеев С. С. Методы и средства акустического контроля: Учебное пособие. – Мн.: БПИ, 1989. – 64 с
- 11.Ультразвуковые пьезопреобразователи для неразрушающего контроля/ Под ред. И.Н.Ермолова.- М.: Машиностроение, 1986. – 280 с.: ил.
12. Бакалов В.П. и др. Основы теории электронных цепей и электроники. М.: Радио и связь,1989.
- 13.Макарин, В. С. Средства неразрушающего контроля отливок : Учеб. пос. для СПТУ / В. С. Макарин. – М. : Высшая школа, 1988. – 72 с.

| | | | | | | |
|------|-------|-----------|--------|------|--|-------|
| | | | | | | Арк.А |
| Змн. | Арк.А | № докум.№ | Підпис | Дата | | 64 |

14. Каневский И.Н., Сальникова Е.Н. Неразрушающие методы контроля: Учебное пособие. - Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. - 243 с.
15. Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн. 2. Акустические Н44 методы контроля: Практ. Пособие / И.Н. Ермолов, Н.П. Алешин, А.И. Потапов; Под ред. В.В. Сухорукова.-- М.: Высш. шк, 1991.--'283 с.
16. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: Справ./ Под общ. ред. В. В. Ключева. – М.: Машиностроение, 1986. – 352 с.: ил.
17. Сергеев С. С. Методы и средства акустического контроля: Учебное пособие. – Мн.: БПИ, 1989. – 64 с.
18. Ультразвуковые пьезопреобразователи для неразрушающего контроля/ Под ред. И.Н.Ермолова.- М.: Машиностроение, 1986. – 280 с.: ил.

| | | | | | | |
|------|-------|-----------|--------|------|--|-------|
| | | | | | | Арк.А |
| Змн. | Арк.А | № докум.№ | Підпис | Дата | | 65 |