

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут»

Факультет радіоелектроніки, комп'ютерних систем та інфокомунікацій

Кафедра радіоелектронних та біомедичних комп'ютеризованих засобів і  
технологій

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА  
ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

магістра

(освітній ступінь)

на тему **«Дослідження параметрів конденсаторів в приладах  
неруйнівного контролю»**

ХАІ.502.560м.23О.172.1805006.ПЗ

Виконав: студент 2 курсу групи №560м

Галузь знань 17«Електроніка та

телекомунікації»

(код та найменування)

Спеціальність 172 «Телекомунікації та

радіотехніка»

Освітня програма «Радіоелектронні

комп'ютеризовані засоби»

(код і найменування напряму підготовки)

Тростянка Д.В.

(прізвище й ініціали студента)

Керівник: к.т.н., доц. Олійник В.М.

(прізвище й ініціали)

Рецензент: д.т.н., проф. Невлюдов І.Ш.

(прізвище й ініціали)

**Міністерство освіти і науки України**  
**Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського**  
**«Харківський авіаційний інститут»**

Факультет Радіоелектроніки, комп'ютерних систем та інфокомунікацій  
(повне найменування)

Кафедра Радіоелектронних та біомедичних комп'ютеризованих засобів і технологій

(повне найменування)

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 17 «Електроніка та телекомунікації»

(код та найменування)

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

(код та найменування)

Освітня програма «Радіоелектронні комп'ютеризовані засоби»

(найменування)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри**

О.В. Висоцька

(підпис)

(ініціали та прізвище)

«10» жовтня 2023 р.

**З А В Д А Н Н Я**

**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА**

Тростянка Дмитра Володимировича

(прізвище, ім'я та по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи «Дослідження параметрів конденсаторів в приладах неруйнівного контролю»

та керівник кваліфікаційної роботи доцент, к.т.н. Олійник В.М.

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

затверджені наказом Університету № 1873а-уч від «10» жовтня 2023 року.

2. Термін подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи 10.01.2024

3. Вихідні дані до роботи: напруга живлення: 1.6 В.; загальний діапазон вимірювання ESR/R: 0.01-700 Ом; загальний діапазон вимірювання ємності: 0.1-999999 мкФ; максимальна напруга зарядженого конденсатора, що вимірюється: 500 В., максимальна енергія конденсатора, що поглинається захистом: 10 Дж

4. Зміст пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розв'язати):

4.1. Аналітичний огляд методів і засобів неруйнівного контролю.

4.2. Розробка та дослідження покращеного методу неруйнівного контролю.

4.3. Практична реалізація дослідження покращеного методу неруйнівного контролю.

4.4. Розробка стартап-проекту впровадження дослідження вимірювача ємності та ESR методом неруйнівного контролю.

5. Перелік графічного матеріалу

5.1. Структурна схема ESR-вимірювача (плакат – А4).

5.2. Схема електрична принципова ESR – вимірювача (креслення – А3).

5.3. Модель руху електронів в конденсаторі (плакат – А4).

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Усі розділи	Олійник В.М. к.т.н., доц.	10.10.2023	

Нормоконтроль \_\_\_\_\_ Олійник В.М. « 11 » січня 2023 р.  
(підпис) (ініціали та прізвище)

7. Дата видачі завдання «10 жовтня» 2023 р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Аналіз завдання.	10.10.2023	
2	Аналітичний огляд методів неруйнівного контролю.	25.10.2023	
3	Постановка задачі дослідження .	09.11.2023	
4	Розробка покращеного методу неруйнівного контролю.	15.11.2023	
5	Практична реалізація дослідження покращеного методу неруйнівного контролю.	28.11.2023	
6	Розробка стартап-проекту.	15.12.2023	
7	Оформлення графічних матеріалів та креслеників.	27.12.2023	
8	Передзахист та рецензування.	11.01.2024	
9	Захист роботи.	19.01.2024	

**Здобувач вищої освіти**

\_\_\_\_\_ (підпис)

**Тростянко Д.В.**

\_\_\_\_\_ (ініціали та прізвище)

**Керівник проекту (роботи)**

\_\_\_\_\_ (підпис)

**Олійник В.М.**

\_\_\_\_\_ (ініціали та прізвище)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи магістра: 136 с., 24 табл., 41 рис., 5 додатків.

АЛГОРИТМ, ВИМІРЮВАННЯ, ДЕГРАДАЦІЯ, КОНДЕНСАТОР, МІКРОФАРАДОМЕТР, МОДЕЛЮВАННЯ, ПЛАТА, СХЕМА.

Об'єкт дослідження – процес дослідження конденсаторів методами неруйнівного контролю.

Предмет дослідження – методи і засоби неруйнівного контролю.

Метою роботи є аналіз існуючих методів і засобів неруйнівного контролю, розробка засобу для діагностики конденсаторів, скорочення часу діагностики приладів за допомогою методів неруйнівного контролю.

Методи дослідження – аналітичний метод, метод моделювання руху електронів в конденсаторі, моделювання процесу заряду і розряду конденсатора.

В ході дослідження проведено аналіз методів неруйнівного контролю та електролітичних конденсаторів. Проведено огляд методів вимірювання параметрів конденсаторів. Розглянуті найкращі схемотехнічні рішення методів вимірювання, їх переваги та недоліки. Був проведений аналіз та моделювання руху електронів в конденсаторі. Побудовано структурну схему та схему електричну принципову приладу. Проведено моделювання процесу заряду і розряду конденсатора. Розроблено стартап-проект на впровадження вимірювача ESR та ємності.

Дана дослідницька робота може бути корисною для фахівців, що спеціалізуються у галузі діагностики конденсаторів.

## ABSTRACT

Explanatory note to the master's thesis: 136 p., 24 tables, 41 drawings, 5 application.

ALGORITHM, MEASUREMENT, DEGRADATION, CAPACITOR, MICROFARADOMETER, SIMULATION, BOARD, SCHEMATIC.

The object of research is the process of researching capacitors using non-destructive testing methods.

The subject of research is methods and means of non-destructive testing.

The purpose of the work is the analysis of existing methods and means of non-destructive testing, the development of a tool for diagnosing capacitors, reducing the time of device diagnostics using non-destructive testing methods.

Research methods – analytical method, method of modeling the movement of electrons in the capacitor, modeling the process of charge and discharge of the capacitor

In the course of the study, an analysis of non-destructive testing methods and electrolytic capacitors was carried out. An overview of methods of measuring capacitor parameters was conducted. The best circuit solutions of measurement methods, their advantages and disadvantages are considered. An analysis and modeling of the movement of electrons in the capacitor was carried out. A structural diagram and an electrical principle diagram were built. Simulation of the process of charge and discharge of the capacitor was carried out. A startup project has been developed to introduce an ESR and capacitance meter.

This research work may be useful for specialists specializing in the field of capacitor diagnostics.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	10
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПРОБЛЕМИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ...	12
1.1 КЛАСИФІКАЦІЯ І ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ МАТЕРІАЛІВ ТА ВИРОБІВ.....	12
1.2 ОСНОВНІ ВИДИ НЕРУЙНІВНИХ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ (НМК) .....	13
1.3 ПОРІВНЯННЯ РУЙНІВНИХ І НЕРУЙНІВНИХ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ .....	18
1.4 МЕТОДИ ВІЗУАЛЬНО-ОПТИЧНОГО КОНТРОЛЮ (ВОК) .....	22
1.5 МЕТОД КОНТРОЛЮ ПРОНИКАЮЧИМИ РЕЧОВИНАМИ.....	25
1.6 МАГНІТНІ МЕТОДИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ (МНК).....	28
1.7 МЕТОД СТРУМОВИХРОВОГО КОНТРОЛЮ (СВК).....	30
1.8 МЕТОДИ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОНТРОЛЮ.....	32
1.9 МЕТОД РАДІОХВИЛЬОВОГО КОНТРОЛЮ .....	34
1.10 МЕТОД РАДІАЦІЙНОГО КОНТРОЛЮ (РК) .....	36
1.11 МЕТОД АКУСТИЧНОГО КОНТРОЛЮ .....	39
1.12 МЕТОД ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЮ.....	40
1.13 ЕЛЕКТРОЛІТИЧНІ КОНДЕНСАТОРИ .....	41
2 РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ .....	46
2.1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ПОКРАЩЕННЯ МЕТОДУ .....	46
2.2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ НОВОГО ПІДХОДУ .....	47
2.3 МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ КОНДЕНСАТОРІВ.....	49
2.4 МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ ЕЛЕКТРОНІВ В КОНДЕНСАТОРІ .....	76
3 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ЗАСОБУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ КОНДЕНСАТОРА.....	81
3.1 ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ.....	81
3.2 ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ПОКРАЩЕНОГО МЕТОДУ ...	84
4 РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ НА ПРОВАДЖЕННЯ ВИМІРЮВАЧА ESR.....	91

4.1 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ АУДИТ ІДЕЇ ПРОЕКТУ .....	93
4.2 АНАЛІЗ РИНКОВИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ЗАПУСКУ СТАРТАП-ПРОЕКТУ .....	94
4.3 РОЗРОБЛЕННЯ МАРКЕТИНГОВОЇ ПРОГРАМИ СТАРТАП-ПРОЕКТУ .....	102
ВИСНОВКИ.....	105
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ .....	106
ДОДАТОК А 2Д ГРАФІК РУХУ ЕЛЕКТРОНІВ ПРИ ДІЇ МАГНІТНИХ ПОЛІВ В КОНДЕНСАТОРІ.....	108
ДОДАТОК Б СТРУКТУРНА СХЕМА ПРИСТРОЮ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ КОНДЕНСАТОРІВ.....	109
ДОДАТОК В СХЕМА ЕЛЕКТРИЧНА ПРИНЦИПОВА ПРИСТРОЮ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ КОНДЕНСАТОРІВ.....	110
ДОДАТОК Г КОД ПРОГРАМИ .....	111
ДОДАТОК Д ПЕРЕЛІК ЕЛЕМЕНТІВ.....	138

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АК – Акустичний контроль.

ВOK – Візуально-оптичний контроль.

ДП – Друкована плата.

ЕК – Електричний контроль.

КПР – Контроль проникаючими речовинами.

НМК – Неруйнівні методи контролю.

МНК – Магнітні методи неруйнівного контролю.

РК – Радіаційний контроль.

РХК – Радіохвильовий контроль.

СВК – Струмовихровий контроль.

ТК – Тепловий контроль.



## ВСТУП

*Актуальність теми.* Конденсатори є ключовими компонентами в багатьох електронних пристроях і системах. Вони використовуються для зберігання електричної енергії і виконання різних функцій у широкому спектрі пристроїв, від мобільних телефонів до автомобілів і промислових систем. Дослідження параметрів конденсаторів методами неруйнівного контролю дозволяє виявляти потенційні дефекти або недоліки в процесі виробництва конденсаторів, що допомагає забезпечити їх якість і надійність.

З часом конденсатори можуть втрачати свої функціональні властивості або проявлятися дефекти через такі причини, як старіння, висока температура, неправильне використання або механічне пошкодження. Дослідження параметрів конденсаторів за допомогою методів неруйнівного контролю дозволяє виявляти зміни в їх характеристиках і передбачати можливі поломки, що дає змогу провести попереджувальне обслуговування та заміну конденсаторів до виникнення серйозних проблем.

Традиційні методи оцінки параметрів конденсаторів, такі як руйнівний аналіз або електричне тестування, можуть бути часозатратними процедурами, особливо при оцінці великої кількості конденсаторів. Використання методів неруйнівного контролю, дозволяє швидко та ефективно визначати параметри конденсаторів без необхідності їх розбирання або знищення.

Тому тема роботи, яка спрямована на дослідження параметрів конденсаторів в приладах методами неруйнівного контролю, дозволить забезпечити більш швидко діагностику конденсаторів, є актуальною науково-технічною задачею.

Робота виконана в Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» на кафедрі радіоелектронних та біомедичних комп'ютеризованих засобів і технологій.

*Мета і завдання дослідження.* Метою роботи є аналіз існуючих методів неруйнівного контролю, розробка вимірювача ESR та ємності, скорочення часу діагностики приладів за допомогою методів неруйнівного контролю.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішення наступних завдань:

- провести аналітичний огляд методів неруйнівного контролю;
- розробити та дослідити метод та засоби неруйнівного контролю;
- провести експериментальну перевірку методу дослідження параметрів конденсаторів методами неруйнівного контролю;
- оцінити ефективність виконаної роботи;
- провести аналіз отриманих наукових досліджень.

*Об'єктом дослідження* є процес дослідження конденсаторів методами неруйнівного контролю.

*Предметом дослідження* є методи та засоби неруйнівного контролю.

*Методи дослідження* - моделювання електричних процесів за допомогою MultiSim з метою вибору оптимального методу неруйнівного контролю.

*Наукова новизна отриманих результатів* полягає в тому, що отримано нову модель, розглянуто зв'язок моделі конденсатора зі схемотехнічною побудовою засобів контролю.

*Практична цінність отриманих результатів* полягає в тому, що розроблений метод дозволяє побудувати засоби неруйнівного контролю конденсатора у приладах широкого профілю, даний метод дозволить прискорити діагностику приладів порівняно з руйнівним аналізом або електричним тестуванням.

# 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПРОБЛЕМИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

## 1.1 Класифікація і характеристика методів контролю якості матеріалів та виробів

Всі види технічного контролю виробничих об'єктів поділяються на 3 групи: руйнівний контроль, пошкоджуючий контроль і неруйнівний контроль.

Руйнівний контроль - це сукупність таких видів контролю, які вимагають відбору проб або вирізки зразків безпосередньо з матеріалу об'єкта. При цьому об'єкт залишається непридатним до відновлення місць відбору проб (зразків).

До руйнуючих видів контролю відносяться:

- лабораторний хімічний аналіз матеріалу об'єкта (вимагає насверловки певного обсягу стружки);
- металографія (дослідження структури металу об'єкта; вимагає вирізки шліфів);
- лабораторні механічні випробування матеріалу об'єкта на розтягнення, стиснення, вигин, ударну в'язкість (вимагає вирізки спеціальних зразків - темплетів).

Пошкоджуючий контроль - це сукупність таких видів контролю, які проводяться безпосередньо на об'єкті, при цьому об'єкт зберігає придатність, але в місцях контролю лишаються непереборні (неустранимые) сліди, які не перешкоджають експлуатації.

До пошкоджуючих видів контролю, зокрема, відносяться:

- вимірювання твердості (твердометрія) втискуванням спеціальних інденторів (бабітові кульки, алмазні наконечники; на поверхні об'єкта залишається вм'ятина);
- стилоскопіювання (оцінка марки сталі за складом оптичного спектру вольтової дуги, створюваної між електродом спеціального приладу
- стилоскопу і поверхнею об'єкта, на якій залишається припік).

Неруйнівні методи контролю (НМК), або дефектоскопія, - це узагальнююча назва методів контролю матеріалів (виробів), що використовуються для виявлення порушення суцільності або однорідності макроструктури, відхилень хімічного складу та інших цілей, що не вимагають руйнування зразків матеріалу та / або виробу в цілому.

Розрізняють поняття «неруйнівний контроль» і «неруйнівний фізичний контроль».

Неруйнівний фізичний контроль - це сукупність таких видів неруйнівного контролю, які вимагають застосування спеціальних речовин, складних приладів і досить наукомістких технологій.

## 1.2 Основні види неруйнівних методів контролю (НМК)

Класифікація неруйнівних методів контролю здійснюється за різними ознаками.

За ступенем проникнення в матеріал всі види неруйнівного фізичного контролю умовно поділяють на дві категорії: поверхневі та об'ємні.

Поверхневі види (методи) неруйнівного контролю - це такі, які дозволяють виявляти тільки дефекти, що мають вихід на доступну для контролю поверхню матеріалу об'єкта.

Об'ємні види (методи) неруйнівного контролю - це такі, які дають можливість виявляти переважно внутрішні дефекти матеріалу, а поверхневі дефекти виявляються, тільки якщо вони достатньо великі.

Залежно від принципу роботи все НМК діляться на акустичні (ультразвукові); капілярні; магнітні (або магнітопорошкові); оптичні (візуально оптичні); радіаційні; радіохвильові; теплові; контроль течнопошуком; електричні; електромагнітні, або струмових рові (методи вихрових струмів).

Акустичні методи засновані на реєстрації коливань, які збуджуються або виникають у контрольованому об'єкті. Їх застосовують для виявлення поверхневих і внутрішніх дефектів (порушень суцільності, неоднорідності

структури, міжкристалітної корозії, дефектів склеювання, пайки, зварювання тощо) в деталях і виробах, виготовлених з різних матеріалів. Вони дозволяють контролювати геометричні параметри при односторонньому допуску до виробу, а також фізико-механічні властивості металів і металовиробів без їх руйнування. У даний час розроблені й успішно застосовуються тіньовий, резонансний, ехоімпульсний, емісійний, велосиметричний, імпедансний і метод вільних коливань. Ці методи називають також ультразвуковими.

Капілярні методи засновані на капілярному проникненні крапель індикаторних рідин в порожнини поверхневих дефектів. При контролі цими методами на очищену поверхню деталі наносять проникаючу рідину, яка заповнює порожнини поверхневих дефектів. Потім рідину видаляють, а решту, що залишилася в порожнинах дефектів, виявляють за допомогою проявника, який утворює індикаторний малюнок. Капілярні методи використовуються в польових, цехових і лабораторних умовах, в широкому діапазоні додатніх і від'ємних температур. Вони дозволяють виявляти термічні та шліфовочні тріщини, волосовини, закати тощо. Капілярні методи можуть бути застосовані для виявлення дефектів в деталях з металів і неметалів простої і складної форми.

Магнітні методи контролю засновані на реєстрації магнітних полів розсіювання, що виникають над дефектами, або на визначенні магнітних властивостей контрольованих виробів. Ці методи дозволяють виявити дефекти типу несучільності матеріалу (тріщини, волосовини, закати), а також визначити механічні характеристики феромагнітних сталей і чавунів щодо зміни їх магнітних характеристик.

Візуально - оптичні методи контролю засновані на взаємодії світлового випромінювання з контрольованим об'єктом (КО). За характером взаємодії розрізняють методи пройденого, відбитого, розсіяного і індукованого випромінювань (під останнім мається на увазі оптичне випромінювання об'єкта під дією зовнішнього впливу, наприклад люмінесценцію).

Інформативними параметрами цих методів є амплітуда, фаза, ступінь поляризації, частота або частотний спектр, час проходження світла через об'єкт, геометрія заломлення або відбиття випромінювання. Оптичні методи широко застосовують через велике розмаїття способів отримання первинної інформації про наявність зовнішніх дефектів незалежно від матеріалу контрольованого виробу.

Радіаційні методи контролю засновані на реєстрації та аналізі проникаючого іонізуючого випромінювання. Використовується рентгенівське, гамма-випромінювання, потоки нейтріно і т.д. Проходячи через товщу виробу, проникаючі випромінювання по-різному послаблюються в дефектному і бездефектному перерізах і несуть інформацію про внутрішню будову речовини і наявність дефектів всередині виробу. Ці методи використовуються для контролю зварних та паяних швів, відливок, прокату тощо.

Радіохвильові методи засновані на реєстрації параметрів електромагнітних хвиль радіодіапазону, взаємодіючих з КО. Зазвичай використовуються хвилі надвисокочастотного (НВЧ) діапазону довжиною 1-100 мм для контролю виробів з матеріалів, де радіохвилі загасають не надто сильно: діелектрики (пластмаса, кераміка, скловолокно), магнітодіелектрики (ферити), напівпровідники, тонкостінні металеві об'єкти. Так само, як оптичні та акустичні, розрізняють методи пройденого, відбитого, розсіяного випромінювання і резонансний метод.

Теплові методи засновані на реєстрації змін теплових або температурних полів КО. Вони застосовні до будь-яких матеріалів.

Розрізняють пасивний (на об'єкти не впливають зовнішнім джерелом тепла) і активний (об'єкт нагрівають або охолоджують) методи. Вимірюваним інформативним параметром є температура або тепловий потік.

При пасивному методі вимірюють температурне поле працюючого об'єкта. Дефект визначається появою місць підвищеної (пониженої)

температури. Таким методом визначають місця витоку теплоти в будівлях; тріщини в двигунах і т.д.

При контролі активним методом об'єкт нагрівають контактним або безконтактним методом і вимірюють температуру з тієї чи іншої сторони об'єкта. Це дозволяє виявляти несутцільності (тріщини, пористість, сторонні включення) в об'єктах, зміни в структурі фізико-механічних властивостей матеріалу за зміною теплопровідності, теплоємності, коефіцієнту теплопередачі. Вимірювання температури або теплових потоків виконують контактним або безконтактним способом. Найбільш ефективний засіб безконтактного спостереження - скануючий тепловізор. Його використовують для визначення дефектів пайки багатошарових виробів з металів і неметалів, клейових з'єднань тощо.

Методи контролю течепошуком засновані на реєстрації індикаторних рідин і газів, які проникають в наскрізні дефекти КО. Їх застосовують для контролю герметичності працюючих під тиском зварних посудин, балонів, трубопроводів, паливної та гідроапаратури, масляних систем силових установок і т.п.

До методів течепошуку відносять гідравлічне опресовування, аміачно - індикаторний метод, контроль за допомогою гелієвого і галоїдного течепошукачів тощо. Проводять течепошук і за допомогою радіоактивних речовин, що значно підвищує чутливість методу.

Електричні методи засновані на реєстрації параметрів електричного поля, що взаємодіє з КО (власне електричний метод), або поля, що виникає в КО в результаті зовнішнього впливу (термоелектричний або трібоелектричний методи).

Первинними інформативними параметрами є електрична ємність або потенціал.

Ємнісний метод використовується для контролю діелектричних або напівпровідникових матеріалів. За зміною провідності, зокрема її реактивної

частини, контролюють хімічний склад пластмас, напівпровідників, наявність в них несучільностей; вологість сипучих матеріалів та інші властивості.

Для контролю провідників застосовують метод електричного потенціалу. Товщину провідного шару, наявність несучільностей поблизу поверхонь провідника контролюють, вимірюючи падіння потенціалу на деякій ділянці. Електричний струм огинає поверхневий дефект, за збільшенням падіння потенціалу на ділянці з дефектом визначають глибину несучільності з похибкою в декілька відсотків.

Термоелектричний метод застосовують для контролю хімічного складу матеріалу. Наприклад, нагрітий до постійної температури мідний електрод притискають до поверхні виробу і за виникаючою різницею потенціалів визначають марку сталі, титану, алюмінію або іншого матеріалу.

Різновидом електричного методу є метод електронної емісії, тобто вимірювання емісії іонів з поверхні виробу під впливом внутрішніх напружень. Цей метод використовується для визначення розтріскувань в емалевих покриттях, для сортування деталей, вимірювання товщини плівкових покриттів і визначення ступеня загартування виробу.

Електромагнітний метод (метод вихрових струмів) заснований на реєстрації змін взаємодії електромагнітного поля котушки з електромагнітним полем вихрових струмів, що наводяться цією котушкою в КО. Його застосовують для виявлення поверхневих дефектів в магнітних і немагнітних деталях і напівфабрикатах. Метод дозволяє виявляти порушення суцільності (в основному тріщини) на різних за конфігурацією деталях.

В першу чергу завжди проводиться візуальний вимірювальний контроль (ВВК). Це обумовлюється тим, що за наявності очевидних непереборних неприпустимих пошкоджень об'єкта інші більш трудомісткі і дорогі процедури не мають сенсу.

В тому випадку, якщо за результатами всіх попередніх процедур об'єкт не бракується, в ряді випадків призначають дослідження його матеріалу руйнівними методами (хімічний аналіз, металографія, механічні



випробування). Якщо програмою діагностування це передбачено і результати випробувань руйнівними методами позитивні, то подальшому неруйнівному контролю повинні бути обов'язково піддані не тільки нормативно регламентовані зони і елементи, але і відновлені місця відбору проб (зразків). Тому неруйнівний фізичний контроль завжди проводять в останню чергу.

В процедуру неруйнівного контролю, як правило, включені як мінімум 2 методи: один поверхневий і один об'ємний.

Поверхневі методи більш прості у виконанні, тому їх використовують перш ніж об'ємні, а об'ємні виконують за відсутності показань на неприпустимі дефекти за результатами поверхневих.

Тільки у разі відсутності протипоказань за результатами всіх процедур діагностування складається позитивний висновок, який містить в собі окремі висновки по кожному виду (методу) контролю.

Процедури контролю на небезпечних виробничих об'єктах можуть виконувати фахівці, навчені і атестовані відповідно до вимог «Правил атестації персоналу в галузі неруйнівного контролю», причому надавати висновки можуть особи з кваліфікацією не нижче II рівня за цим методом для даного виду об'єктів. Лабораторії, що виконують діагностування, повинні бути атестовані у відповідності з вимогами «Правил атестації лабораторій неруйнівного контролю».

### 1.3 Порівняння руйнівних і неруйнівних методів контролю

Нижче наводиться перелік переваг і недоліків неруйнівних і руйнівних методів контролю.

Переваги руйнівних методів контролю:

1. Випробування зазвичай імітують одну або кілька робочих умов. Отже, вони безпосередньо спрямовані на вимірювання експлуатаційної надійності.
2. Випробування звичайно являють собою кількісні вимірювання руйнівних навантажень або терміну служби до руйнування при даному

навантаженні і умовах. Таким чином, вони дозволяють отримати числові дані, корисні для конструювання або для розробки стандартів або специфікацій.

3. Зв'язок між більшістю вимірювань руйнуючим контролем і вимірюваними властивостями матеріалів (особливо під навантаженням, що імітує робочі умови) зазвичай прямий. Отже виключаються суперечки за результатами випробування та їх значенню для експлуатаційної надійності матеріалу або деталі.

Недоліки руйнівних методів контролю:

1. Випробування не проводять на об'єктах, фактично використовуваних в експлуатаційних умовах. Отже, відповідність між випробовуваними об'єктами і об'єктами, що використовуються в експлуатації, (особливо в інших умовах), має бути доведено іншим способом.

2. Випробування можуть проводитися тільки на частині виробів з партії. Вони, можливо, будуть мати невелику цінність, коли властивості змінюються від деталі до деталі.

3. Часто випробування неможливо проводити на цілій деталі. Випробування в цьому випадку обмежуються зразком, вирізаним з деталі або спеціального матеріалу, що володіють властивостями матеріалу деталі, який буде застосовуватися в робочих умовах.

4. Одиначне випробування з руйнуванням може визначити тільки одне або декілька властивостей, які можуть впливати на надійність виробу в робочих умовах.

5. Руйнівні методи контролю важко застосовувати до деталі в умовах експлуатації. Зазвичай для цього робота припиняється і дана деталь видаляється з робочих умов.

6. Кумулятивні зміни протягом періоду часу не можна виміряти на одній окремій деталі. Якщо кілька деталей з однієї і тієї ж партії випробовується послідовно протягом якогось часу, то потрібно довести, що деталі були однаковими. Якщо деталі застосовуються в робочих умовах і видаляються після різних періодів часу, необхідно довести, що кожна була піддана впливу

аналогічних робочих умов, перш ніж можуть бути отримані обґрунтовані результати.

7. Коли деталі виготовлені з дорогого матеріалу, вартість заміни деталей, що вийшли з ладу, може бути дуже висока. При цьому неможливо виконати відповідну кількість і різновиди руйнівних методів випробувань.

8. Багато руйнівних методів випробувань вимагають механічної або іншої попередньої обробки зразка. Часто потрібні великогабаритні машини, які дають дуже точні результати. У підсумку вартість випробувань може бути дуже високою, а число зразків для випробувань обмеженим. Крім того, ці випробування вельми трудомісткі і можуть проводитися тільки працівниками високої кваліфікації.

9. Руйнівні випробування вимагають великої витрати людиногодин. Виробництво деталей коштує надзвичайно дорого, якщо відповідні тривалі випробування застосовуються як основний метод контролю якості продукції.

#### Переваги неруйнівних методів контролю

1. Випробування проводяться безпосередньо на виробах, які будуть застосовуватися в робочих умовах.

2. Випробування можна проводити на будь-якій деталі, призначеній для роботи в реальних умовах, якщо це економічно обґрунтовано. Ці випробування можна проводити навіть тоді, коли в партії є велика різниця між деталями.

3. Випробування можна проводити на цілій деталі або на всіх її небезпечних ділянках. Більшість небезпечних з точки зору експлуатаційної надійності ділянок деталі можуть бути досліджені одночасно або послідовно, залежно від зручності та доцільності.

4. Можуть бути проведені випробування багатьма НМК, кожен з яких чутливий до різних властивостей або частин матеріалу або деталі. Таким чином, є можливість виміряти стільки різних властивостей, пов'язаних з робочими умовами, скільки необхідно.

5. Неруйнівні методи контролю часто можна застосовувати до деталі в робочих умовах, без припинення роботи, крім звичайного ремонту або періодів простою. Вони не порушують і не змінюють характеристик робочих деталей.

6. Неруйнівні методи контролю дозволяють застосувати повторний контроль даних деталей протягом будь-якого періоду часу. Таким чином, ступінь пошкоджень в процесі експлуатації, якщо її можна виявити, та її зв'язок з руйнуванням в процесі експлуатації можуть бути точно встановлені.

7. При неруйнівних методах випробувань деталі, виготовлені з дорогого матеріалу, не виходять з ладу при контролі. Можливі повторні випробування під час виробництва або експлуатації, коли вони економічно і практично виправдані.

8. При неруйнівних методах випробувань потрібна невелика (або зовсім не потрібна) попередня обробка зразків. Деякі пристрої для випробувань є портативними, мають високу швидкість, в ряді випадків контроль може бути повністю автоматизованим. Вартість НМК нижче, ніж відповідна вартість руйнівних методів контролю.

9. Більшість неруйнівних методів випробування короткочасні і вимагають меншої затрати людиногодин, ніж типові руйнівні методи випробувань. Ці методи можна використовувати для контролю всіх деталей при меншій вартості або вартості, що порівняна з вартістю руйнівних методів випробувань лише невеликого відсотка деталей в цілій партії.

#### Недоліки неруйнівних методів контролю

1. Випробування зазвичай включають в себе непрямі вимірювання властивостей, які не мають безпосереднього значення при експлуатації. Зв'язок між цими вимірюваннями та експлуатаційною надійністю повинен бути доведений іншими способами.

2. Випробування зазвичай якісні і рідко - кількісні. Зазвичай вони не дають можливості вимірювання руйнівних навантажень і терміну служби до

руйнування навіть побічно. Вони можуть, однак, виявити дефект або простежити процес руйнування.

#### 1.4 Метод візуально-оптичного контролю (ВОК)

##### 1.4.1 Візуально-оптичний контроль (ВОК)

Оптичні прилади ендоскопи дозволяють оглядати деталі і поверхні елементів конструкції, приховані близько розташованими деталями і недоступні прямому спостереженню.

Візуальний контроль з використанням оптичних приладів називають візуально-оптичним (або оптичним).

Візуально-оптичний контроль і візуальний огляд - найбільш доступний і простий метод виявлення поверхневих дефектів деталей.

Основні переваги цього методу - простота контролю, нескладне обладнання, порівняно мала трудомісткість.

До недоліків слід віднести низьку вірогідність і чутливість, тому такий метод контролю застосовують у наступних випадках:

для пошуку поверхневих дефектів (тріщин, пор, відкритих раковин і т.п.) при візуально-оптичному контролі деталей, доступних для безпосереднього огляду, а також більш дрібних тріщин при кольоровому, капілярному, люмінесцентному, магнітопорошковому і рентгенографічному контролі;

для виявлення великих тріщин, місць руйнування конструкцій, течі, забруднень, сторонніх предметів усередині закритих конструкцій;

для аналізу характеру і визначення типу поверхневих дефектів, виявлених при контролі яким-небудь іншим методом дефектоскопії (акустичним, струмовихровим, і т.д.).

Слід пам'ятати, що дефекти навіть відносно великих розмірів, невидимі неозброєним оком через малий контраст з фоном, при використанні оптичних приладів, як правило, не виявляються.

Сучасні методи оптичного контролю засновані на взаємодії світлового випромінювання з поверхнею контрольованого об'єкта. При цьому

розглядаються такі спектральні характеристики, як коефіцієнт спектрального випромінювання і поглинання, спектральний коефіцієнт пропускання, відбивання і показник заломлення.

#### 1.4.2 Метод оптичного контролю

Оптичний вид контролю регламентується стандартом ГОСТ 23479-79 «Контроль неруйнівний. Методи оптичного виду. Загальні вимоги». Цей стандарт класифікує чутливість оптичного контролю за двома основними параметрами: кратність збільшення оптичних засобів і освітленість контрольованої поверхні. На небезпечних виробничих об'єктах застосовується кратність збільшення оптичних засобів не нижче  $4\times$  і освітленість контрольованої поверхні не менше 500 лк.

Оптичний вид контролю включає в себе 3 методи:

1. Зовнішній метод.
2. Перископічний метод.
3. Ендоскопічний метод.

Зовнішній метод дозволяє обстежити тільки легко доступні зовнішні поверхні об'єкту і широкі порожнини, в які оператор може проникнути з простими засобами оптичного контролю (оптичної системою). Використовуючи його, можна оглядати внутрішні поверхні вузьких, тим більше вигнутих порожнин.

Оптична система - це сукупність оптичних деталей (лінз, призм, дзеркал і т.п.), призначена для певного формування пучків світлових променів.

До простих оптичних систем відносяться дзеркала, лінзи, окуляри, лупи. Більш складні системи зовнішнього оптичного контролю - телескопи, мікроскопи.

Одним з найбільш простих способів зовнішнього оптичного контролю важкодоступних поверхонь або поверхонь, нахилених менш, ніж  $0\ 30$  до зорової осі ока, є їх огляд за допомогою дзеркал. Застосовують плоскі дзеркала і сферичні.

Плоским дзеркалом називають оптичну деталь з плоскою поверхнею, що відбиває, призначену для зміни напрямку осі оптичної системи. Комбінація з таких дзеркал може забезпечити поворот зображення. Відбивна здатність дзеркала досягає 95%.

Сферичним дзеркалом називають оптичну деталь, сферична поверхня якої є відбивною.

Лінза - оптична деталь, обмежена заломлюючими поверхнями, з яких хоча б одна є поверхнею обертання. За оптичними властивостям лінзи ділять на дві основні групи:

- 1) позитивні, тобто збірні;
- 2) негативні, тобто такі, що розсіюють.

Лінзи відрізняються одна від одної відстанню центрів утворюючих їх сферичних поверхонь, радіусами і показниками заломлення речовини, з якої вони зроблені. Величина оптичної сили лінзи визначається фокусною відстанню, яка залежить від кривизни заломлюючих поверхонь, показника заломлення і товщини лінзи. Наприклад, двоякоопукла лінза з великою кривизною поверхонь має меншу фокусну відстань і велику оптичну силу, так як оптична сила лінзи обернено пропорційна її задній фокусній відстані.

За одиницю вимірювання оптичної сили лінзи приймають оптичну силу такої лінзи, фокусна відстань якої дорівнює 1 м; така одиниця називається діоптрією. У промисловості діоптрія позначається «дптр».

Наприклад, у позитивних лінз з фокусною відстанню +0,4 м оптична сила становить 2,5 дптр. У негативних лінз з фокусною відстанню - 0,4 м оптична сила -2,5 дптр, а для - 4,0 м вона дорівнює -0,25 дптр.

Лінзи - це засоби корекції зору. Їх можна розділити на дві групи:

- 1) одноелементні (окулярні і контактні лінзи, однолінзові лупи, діафрагми різних видів);
- 2) багатоелементні (багатолінзові лупи, телескопічні та проєкційні системи).

Для контролю близько розташованих деталей (що знаходяться на відстані не більше 250 мм від очей контролера) використовують лупи та мікроскопи різного типу.

Мікроскопи призначені для спостереження близько розташованих предметів. Робочі мікроскопи, використовувані в цехах, мають збільшення порядку 40×, поле зору близько 5 мм. Їх застосовують при контролі поверхонь з гальванічними покриттями, пофарбованих і полірованих поверхонь.

Мікроскопи вимірювальні використовуються в машинобудуванні для точних вимірювань лінійних розмірів контрольованого об'єкта. Точність вимірювання лінійних розмірів становить від 0,01 до 0,001 мм; кутових - від 10 до 1'; межа вимірювання лінійних розмірів - 50-200 мм.

Мікроскопи металографічні використовуються для дослідження мікроструктури металів та інших непрозорих об'єктів. Працюють у відбитому світлі. Збільшення від 10× до 350, при фотографуванні від 45 × до 2 000.

### 1.5 Метод контролю проникаючими речовинами

Цей вид контролю в цілому базується на здатності тих чи інших речовин проникати в слабо розкриті зовнішні і наскрізні дефекти в твердих стінках контрольованих об'єктів.

#### 1.5.1 Методи контролю проникаючими речовинами

При контролі проникаючими речовинами використовують газоаналітичний, газогідравлічний, вакуумно-рідинний і капілярний методи (табл. 1.1). Перші три методи об'єднані поняттям «течопошук».

Таблиця 1.1. Методи контролю проникаючими речовинами

Метод	Контрольовані об'єкти	Дефекти, що виявляються
-------	-----------------------	-------------------------



Газоаналітичний	Судини, балони, аміачні трубопроводи	Тільки наскрізні
Газогідравлічний	Балони, дюкери	
Вакуумно-рідинний	Днища і стінки резервуарів	
Капілярний	Будь-які тверді	Зовнішні наскрізні і нескрізні

Газоаналітичний метод полягає в наступному (рис. 1.1).

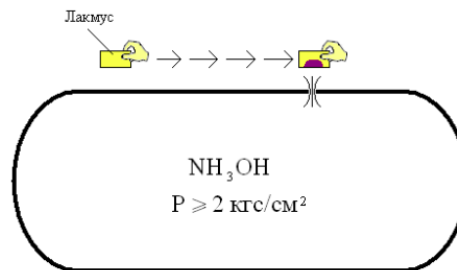


Рисунок 1.1 - Пошук наскрізних дефектів в стінці балона газоаналітичним методом

Герметично закритий об'єкт наповнюють хімічно активним газом (аміак) під тиском. Як індикатор використовують відрізок лакмусового паперу або спеціальний портативний прилад - газоаналізатор. Лакмусом або датчиком газоаналізатора повільно сканують всю зовнішню поверхню об'єкта. В зоні, де є наскрізний дефект, утворюється витік аміаку, в результаті в цьому місці лакмус темніє, а газоаналізатор дає відповідні покази.

Газогідравлічний метод в побуті іноді називають «бульбашковим» (рис. 1.2). Герметично закритий об'єкт наповнюють повітрям під тиском і занурюють у прозору рідину (дюкери - підводні переходи різних трубопроводів через водойми - свідомо занурені в неї). У точці, де є наскрізний дефект, утворюється витік повітря в рідину, в результаті в цьому місці в рідині виникає ланцюжок висхідних бульбашок. У побуті цей метод добре знайомий велосипедистам - саме так вони виявляють дрібні проколи в камерах коліс.

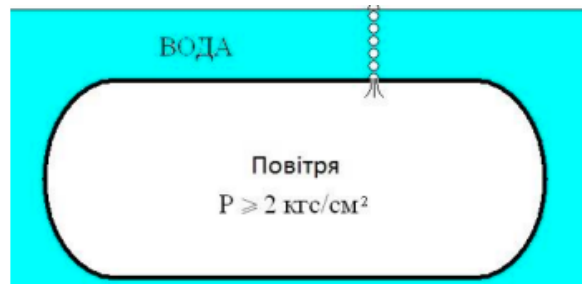


Рисунок 1.2 - Пошук наскрізних дефектів в стінці балона газогідравлічним методом

Вакуумно-рідинний метод (рис. 1.3) широко застосовується при контролі герметичності днищ і стінок резервуарів для зберігання нафти і нафтопродуктів. Засобами контролю є електричний вакуумний насос, вакуумний манометр і вакуум-камера, що представляє собою лист товстого оргскла із штуцером, обнесений по контуру товстою смугою пористої гуми. Насос, манометр і камера з'єднані між собою гумовими шлангами. В якості індикаторного засобу використовується рідке мило або звичайний косметичний шампунь. Контрольовану ділянку об'єкта рясно покривають шаром мила, накривають вакуум-камерою і відкачують з-під неї повітря. Ступінь вакууму повинна бути не менше -  $0,75 \text{ кгс} / 2 \text{ см}$ . Якщо під камерою мається наскрізний дефект, то під дією зовнішнього атмосферного тиску зовнішнє повітря спрямовується крізь нього в порожнину камери, і над дефектом виникає спучення мильного шару, яке оператор добре бачить крізь прозору кришку камери.

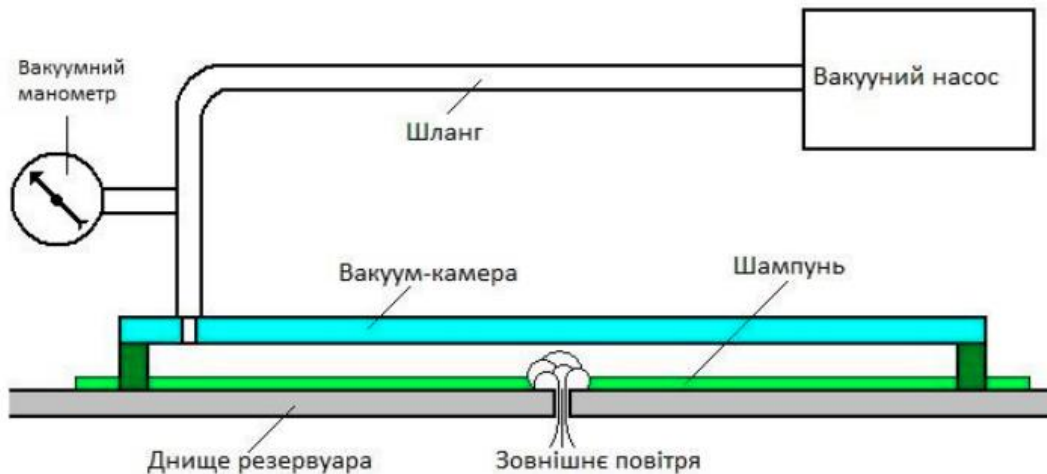


Рисунок 1.3 - Пошук наскрізних дефектів в днищі резервуара вакуумно-рідинним методом

### 1.6 Магнітні методи неруйнівного контролю (МНК)

МНК застосовуються тільки для контролю деталей і виробів, виготовлених з феромагнітних матеріалів, що знаходяться в намагніченому стані. МНК засновані на реєстрації магнітних полів розсіювання, що виникають над дефектами, тому ці методи дозволяють визначати тільки поверхневі і підповерхневі дефекти, що залягають у феромагнетиках на глибинах, що не перевищують 15 мм.

Дефекти найбільш легко виявляються, коли напрямок намагнічування контрольованої деталі перпендикулярний напрямку дефекту. Для оптимального виявлення дефектів при МНК намагнічування контрольованих виробів проводять у двох напрямках, а деталей складної форми - у кількох напрямках.

На рис. 1.4 наведена схема утворення магнітного поля над дефектом. Контрольована деталь 1 з тріщиною 2 поміщена між полюсами N-S постійного магніту (електромагніту). Над тріщиною виникає магнітне поле розсіювання 3, еквівалентне маленькому магніту з полюсами N-S

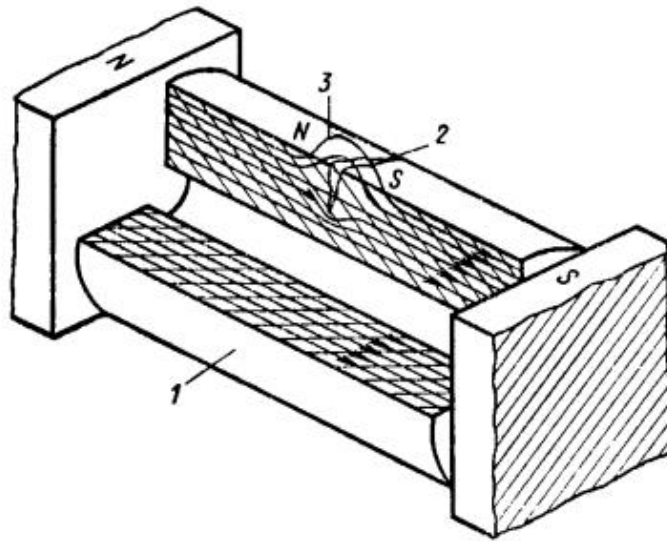


Рисунок 1.4 – Схема утворення магнітного поля над дефектом

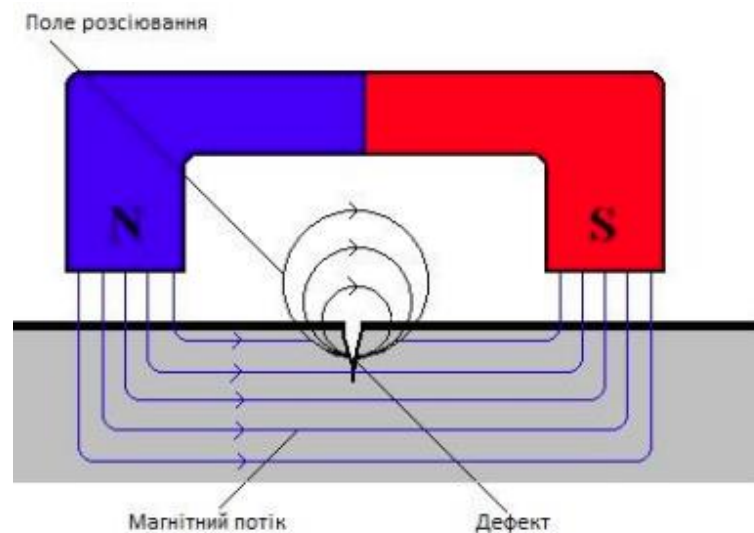


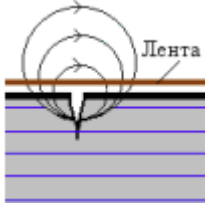
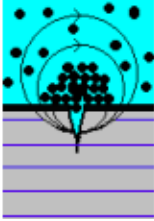
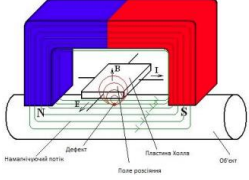
Рисунок 1.5 – Поле розсіювання над дефектом

На таблиці 1.2 представлені активні методи магнітного контролю.

Таблиця 1.2. Активні методи магнітного контролю

Метод	Короткий опис	Ескіз
Магнітоферрозондовий	Поле розсіювання над дефектом збуджує ЕРС в датчику - котушці, замкненій на індикатор	

## Продовження 1.2. Активні методи магнітного контролю

Магнітографічний	Поле розсіювання над дефектом залишає на магнітній стрічці магнітне п'ятно, яке далі візуалізується в спеціальному відеомагнітофоні	
Магнітопорошковий	При поливі поверхні магнітопорошковою суспензією поле розсіювання над дефектом стягує на себе частинки чорного магнітного порошку	
Метод ефекту Холла	Поле розсіювання над дефектом викликає відхилення траєкторії електричного струму пластині Холла	

### 1.7 Методи струмовихрового контролю (СВК)

#### 1.7.1 Загальна характеристика вихрострумового контролю

Вихрострумний контроль заснований на аналізі взаємодії електромагнітного поля зовнішнього джерела (обмотка збудження ВСП) з електромагнітним полем вихрових струмів, збуджених в ОК змінним магнітним полем ВСП.

Розподіл густини вихрових струмів в електропровідному об'єкті контролю визначається джерелом електромагнітного поля, геометричними і електромагнітними параметрами ОК, а також взаємним розташуванням ВСП і ОК. Збуджуюча котушка ВСП може розташовуватися поблизу ОК (рис. 1.6, а

- накладний ВСП), а також проходити всередині трубчастого ОК або облягати його (рис. 1.6, б, в - прохідні ВСП).

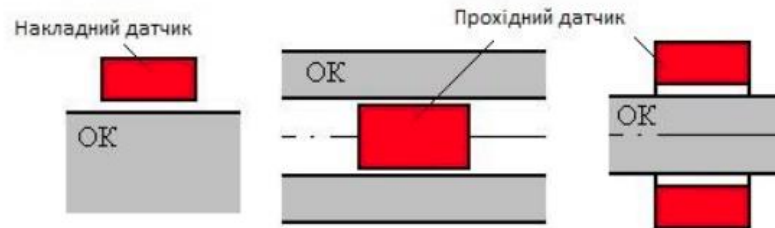


Рисунок 1.6 – Накладний (а) та прохідні (б,в) ВСП

Форма кривих розподілу вихрових струмів повторює форму витків обмотки збудження ВСП з урахуванням форми ОК (рис. 1.7, струми  $i_a$ ). В результаті дії вихрових струмів в ОК змінюється результуюче магнітне поле.

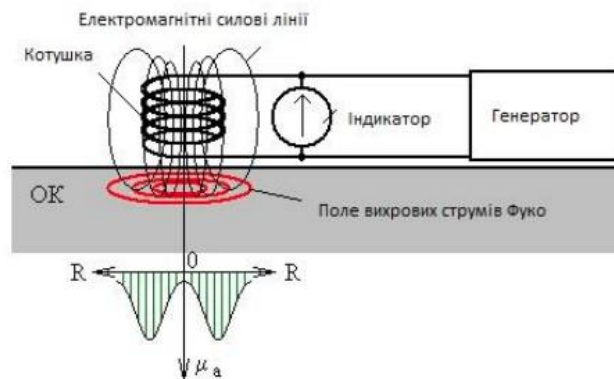


Рисунок 1.7 – Схема принципу дії приладу з накладним ВСП

Струмовихровий вид контролю (іноді його називають електромагнітний) містить тільки два методи: вихрострумову дефектоскопію і вихрострумову товщинометрію. Обидва ці методи на відміну від магнітних можуть застосовуватися на будь-яких твердих металах.

За допомогою вихрострумової дефектоскопії можна виявляти зовнішні і підповерхневі (не глибше 2 мм) дефекти розкриттям від 1 мкм і більше. Створюване котушкою поле вихрових струмів Фуко однорідне, якщо під котушкою немає дефектів. Це поле у відповідь збуджує в котушці вторинну

електрорушійну силу, яка певною мірою змінює амплітуду струму. При калібруванні приладу на бездефектному зразку підсумковий рівень амплітуди приймають за базовий, балансуєчи індикатор в нульове значення.

Якщо далі при контролі об'єкта в процесі сканування котушкою його поверхні під датчиком виявляється дефект, то він спотворює поле вихрових струмів, змінюєчи ступінь його впливу на амплітуду струму в котушці. Це викликає розбаланс індикатора, що і служить ознакою дефекту.

Вихрострумова товщинометрія використовується для вимірювання товщини металізації на неметалевих матеріалах (наприклад, заготовки для друкованих (печатних) плат в радіоелектроніці) або навпаки - товщини захисних неметалевих покриттів на металі (наприклад, електроізоляція). Зменшення товщини досліджуваного покриття викликає ущільнення поля вихрових струмів під датчиком і посилення його впливу на амплітуду струму в котушці. Оскільки існує кореляція між товщиною покриття і щільністю створюваного поля струмів Фуко, це і дає можливість чисельної оцінки товщини покриття цим методом, але в межах не більше 2 мм.

### 1.8 Методи електричного контролю

Електричний контроль включає в себе три методи: електропотенціальний, електроіскровий і електроємнісний.

Електропотенціальний метод призначений для вимірювання глибини зовнішніх тріщин в металі, виявлених раніше іншими методами. Він заснований на вимірюванні електричного опору  $R$  (мікрооми) локальної досліджуваної ділянки електропровідного об'єкта і порівняні результату з опором аналогічного еталонного (завідомо бездефектного) елемента такої ж довжини. Проте в таких умовах мова йде про вимірювання дуже малих значень опору, тому використовується струм високої частоти, що характеризується активним проявом так званого скін-ефекту, а в якості вимірювального пристрою застосовується вимірювач дуже малих значень електроопору - мікрометр, включений за схемою моста Уїнстона.

Скін-ефект (від англ. skin - шкура) полягає в тому, що електричне поле струму високої частоти (ВЧ) охоплює не всю висоту перерізу провідника, а лише сегментоподібну приповерхневу зону між електродами (рис. 1.8).

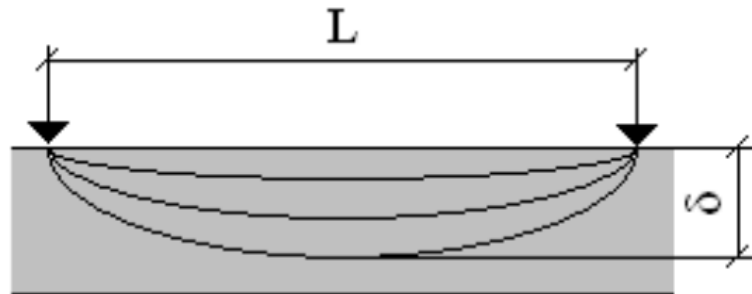


Рисунок 1.8 – До пояснення поняття «скін-ефект»

Принцип дії електропотенціального методу вимірювання глибини тріщини показаний на рис. 1.9.

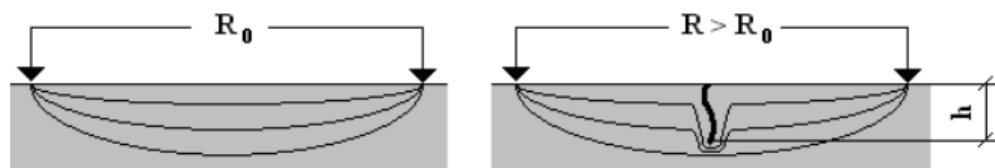


Рисунок 1.9 – Принцип дії електропотенціального методу вимірювання глибини тріщини

Електроіскровий і електроємнісний методи широко використовуються в машинобудуванні, суднобудуванні, авіаційній і космічній промисловості і призначені для вимірювання товщини ізолюючих покриттів провідників в електричних системах. Крім того, електроіскровий метод дозволяє виявляти місця наскрізного пробоя ізоляції. При цьому основним елементом апаратури є вимірювач дуже великих значень електроопору - мегаомметр, один полюс якого підключається до досліджуваного провідника, а другий - до електрода, яким сканують поверхню ізоляції. У місцях, де її товщина зменшується, спостерігається пропорційне цьому зменшення опору, а там, де є наскрізний



пробій, виникає вольтова дуга (іскра), оскільки прилад використовує струм великої сили. У цьому випадку покази приладу пульсують (рис. 1.10).

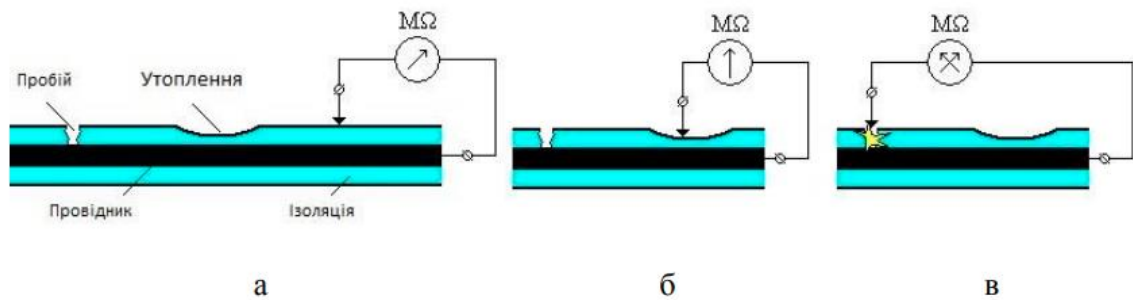


Рисунок 1.10 – Реакція електроіскрового приладу на стан ізоляції:

а – на бездефектній ділянці; б – в зоні утончення ізоляції; в – на пробії

При електроємнісному методі основним елементом апаратури є вимірювач ємності - мікрофарадометр, один полюс якого підключається до досліджуваного провідника, а другий - до спеціальної металевої пластини, якою сканують поверхню ізоляції (рис. 1.11)

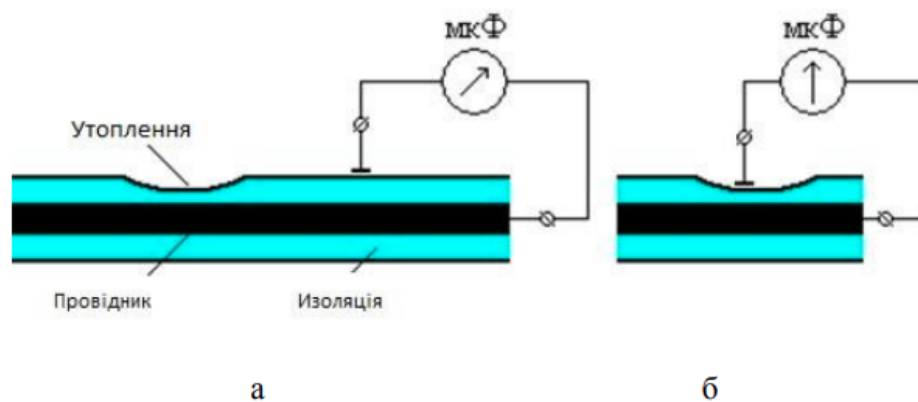


Рисунок 1.11 – Реакція електроємнісного приладу на стан ізоляції: а – на бездефектній ділянці; б – в зоні утончення ізоляції

### 1.9 Методи радіохвильового контролю

Радіохвильовий контроль заснований на тому, що всі метали є перешкодою для радіохвиль, відбиваючи або поглинаючи їх (поглинання радіохвиль відбувається шляхом їх перетворення в електричний струм в металі, якщо цей метал надійно заземлений).

Наскрізний (радіотіньовий) метод відноситься до класу методів проходження. Він полягає в тому, що крізь досліджуваний об'єкт пропускають потік радіохвиль (рис. 1.12, а). Якщо на шляху потоку в об'єкті є металеве включення, воно відтіняє частину хвильового потоку і амплітуда  $A$  сигналу на прийомі падає щодо значення  $A_0$ , отриманого на вільній ділянці, що і є ознакою присутності металевих включень (рис. 1.12, б).

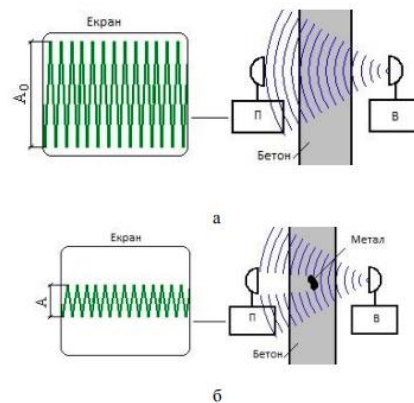


Рисунок 1.12 – Принцип наскрізного радіохвильового методу:

а – на ділянці об'єкта без металевих включень

б – на ділянці з металевим включенням

Серед достоїнств наскрізного методу можна відзначити наступні:

- може бути реалізований в безперервному режимі випромінювання радіохвиль, що істотно спрощує радіоапаратуру;
- не критичний до заземлення досліджуваних металевих включень.

Недоліки наскрізного методу:

- вимагає двостороннього доступу до об'єкта з максимально співвісним розташуванням антен випромінювача і приймача;
- не дає можливості визначити глибину залягання металевих включень.

Радіолокаційний метод відноситься до класу методів відбивання. Він полягає в тому, що в досліджуваний об'єкт запускають імпульси радіохвиль (рис. 1.13). Якщо на шляху потоку в об'єкті є незаземлене металеве включення,

воно відбиває частину хвильового потоку, і сумісна по випромінюванню і прийому антена приладу приймає радіоехо від металевих включень.

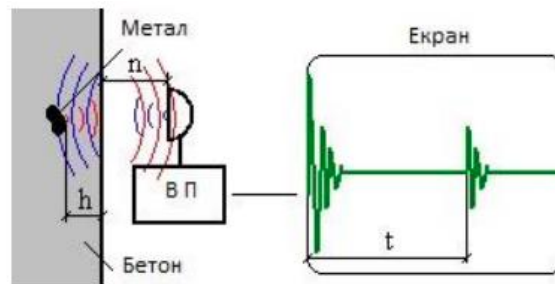


Рисунок 1.13 – Принцип радіолокаційного методу

Переваги радіолокаційного методу:

- не вимагає двостороннього доступу до об'єкта;
- дозволяє автоматично визначати глибину залягання металевих включень:

$$h = 0,5C t - n \quad (1.1)$$

, де  $C$  - швидкість поширення радіохвиль (швидкість світла);  $t$  - час між послідовним імпульсом і прийомом його відбиття (вимірюється в наносекундах);  $n$  - фіксована величина зазору між поверхнею об'єкта та антеною.

Недоліком радіолокаційного методу є те, що заземлені металеві включення дають слабе відбивання радіохвиль.[1]

#### 1.10 Метод радіаційного контролю (РК)

Радіаційний контроль - це вид НМК, заснований на взаємодії проникаючого іонізуючого випромінювання (ІВ) з контрольованим об'єктом (КО). Всі методи радіаційного контролю засновані на пропусканні іонізуючого випромінювання через твердий матеріал об'єкта і тому відносяться тільки до класу методів проходження. Радіаційні методи найчастіше застосовують при контролі якості зварних з'єднань.

Система радіаційного контролю (РК) складається з чотирьох основних елементів (рис. 1.14):

1. джерела випромінювання,
2. об'єкта контролю,
3. детектора випромінювання,
4. засобів розшифровки та оцінки результатів контролю.

Властивості елементів системи контролю, які впливають на результати, називають характеристиками системи контролю або її параметрами.

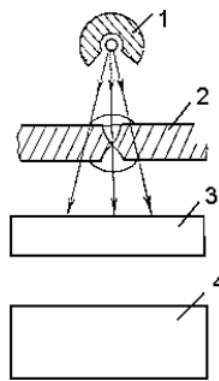


Рисунок 1.14 – Система радіаційного контролю:

1 – джерело випромінювання; 2 – об'єкт контролю; 3 – детектор випромінювання; 4 – засоби розшифровки та оцінки результатів контролю

До характеристик джерела випромінювання відносяться:

1. енергія та інтенсивність випромінювання, розмір активної частини випромінювача;
2. об'єкт контролю характеризується товщиною і густиною матеріалу;
3. характеристики детектора випромінювання - контрастність, чутливість, ефективність тощо.

Засоби розшифровки та оцінки результатів контролю обумовлені кваліфікацією і досвідом дефектоскопіста і досконалістю технічної документації.

До параметрів системи РК відносяться також величини, що характеризують взаємне розташування елементів системи контролю в просторі і в часі, наприклад, відстань від джерела випромінювання до детектора, час експозиції тощо.

Система РК в цілому також характеризується величиною дефектів, виявляємих з заданою ймовірністю і продуктивністю контролю. Вимоги до цих основних характеристик залежать від вимог до якості контрольованих виробів.

В групу методів радіаційного контролю входять рентгенографічний, гамаграфічний і рентгеноскопічний.

Схема рентгенографічного методу показана на рис. 1.15. Джерелом випромінювання є спеціальний генеруючий апарат, розташований по один бік від об'єкта, а на іншому боці кріпиться рентгенівська фотоплівка, упакована в гнучку світлонепроникну касету. Апарат керується дистанційно (ДУ) за допомогою реле часу, яким задається час просвічування (експозиції).

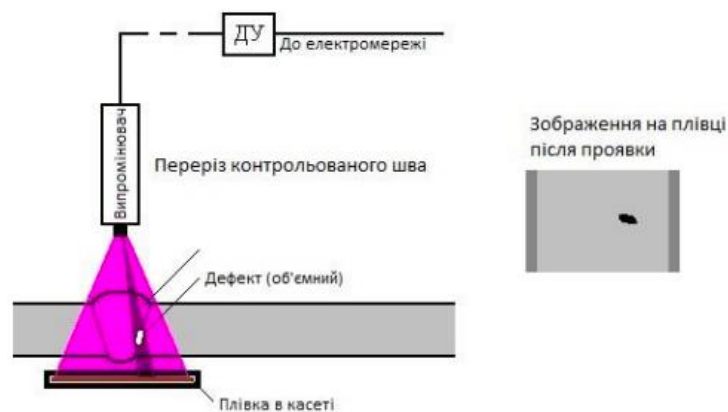


Рисунок 1.15 – Схема рентгенографічного методу

Гамаграфічний метод (рис. 1.16) відрізняється від рентгенографічного тим, що тут застосовуються негенеруючі (тобто неперервно самовипромінюючі) потужні природні джерела гамма-випромінювання - елементи з радіоактивних металів (уран, стронцій, іридій, кобальт), поміщені в спеціальні переносні свинцеві колби з дистанційно керованим затвором.



Рисунок 1.16 – Схема гамаграфічного методу

На відміну від рентгенографічного та гамаграфічного рентгеноскопичний метод (рис. 1.17) - стаціонарний, оскільки в цьому випадку потужний рентгенівський апарат, перетворювач зображення і контрольований об'єкт повинні бути поміщені в спеціальній камері (бункері). Товсті стіни камери виконані з бетону з свинцевим наповнювачем (дріб), приміщення забезпечене датчиками присутності, а входні двері - датчиком закриття: система не буде працювати, якщо двері камери відкриті або в камері перебувають люди. З трьох розглянутих тут методів рентгеноскопичний - найпотужніший, він дозволяє просвічувати сталеві вироби товщиною до 80 мм. Отримане зображення перетворюється в телевізійне та по кабелю передається на монітор, розташований у віддаленому від рентген- камери приміщенні оператора.[1]

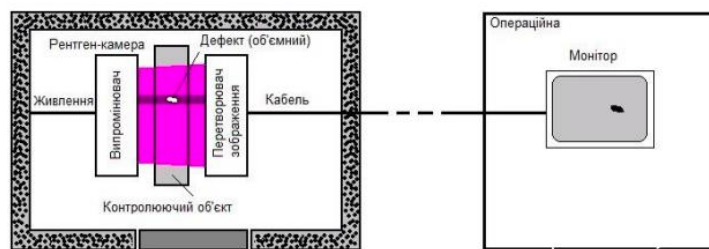


Рисунок 1.17 – Схема рентгеноскопичного методу

### 1.11 Метод акустичного контролю

З усіх видів неруйнівного контролю акустичний - найбільш «багатий» за кількістю методів. Класифікація цих методів наведена в табл. 1.3

Таблиця 1.3. Методи акустичного контролю

Активні													Пасивні										
Ультразвукові методи бігучих хвиль						Спектральні						Імпедансний			Акустико-емісійний								
Засновані на проходженні			Комбіновані			Засновані на відбиванні		Вимушених коливань		Вільних коливань								Шумодіагностичний			Вібродіагностичний		
Тіньовий амплітудний	Тіньовий часовий	Велосиметричний	Дзеркально-тіньовий	Ехо-тіньовий	Ехо-метод	Ехо-дзеркальний	Дельта-метод	Дифракційно-часовий	Реввербаційний	Товщинометрія	Локальний	Інтегральний	Локальний	Інтегральний	Акустико-емісійний								

Пасивні методи - методи контролю, при яких не потрібно внесення в матеріал енергії даного виду (дефект сам проявляє себе її (енергії) випромінюванням). Активні методи - методи контролю, при яких в матеріал вноситься енергія даного виду і про стан матеріалу судять по явищам, що відбуваються з цією енергією.

### 1.12 Метод теплового контролю

Тепловий вид неруйнівного контролю включає в себе методи інфрачервоної дефектоскопії та пірометрії.

Інфрачервона дефектоскопія знайшла застосування в цивільній промисловості лише наприкінці 1970-х рр. Метод заснований на тому, що в місцях дефектів металу підігрітого об'єкта або в зонах стоншування стінок трубопроводу з підігрітим середовищем тепло передається від внутрішньої до зовнішньої поверхні стінки дещо більшою мірою, ніж в оточуючих бездефектних зонах. Тепловізор перетворює картину теплового розподілу на

поверхні об'єкту в відеозображення. Чутливість сучасних тепловізорів обчислюється десятими частками градуса.[1]

Зовнішній вигляд деяких тепловідеокамер показаний на рис. 1.18. Всі прилади забезпечені лазерним покажчиком контрольованої зони.



Рисунок 1.18 Сучасні моделі тепловізорів:

а - «SAT S-160»; б - «SAT S-280»; в - «SAT HY-6800»; г - «SAT G-90»

### 1.13 Електролітичні конденсатори

Електролітичний конденсатор — це тип конденсатора, який має вищу ємність, ніж інші типи конденсаторів, завдяки використанню електроліту. Електроліт - це рідина або гель з високою концентрацією іонів. Він може забезпечити такий самий рівень потужності низькочастотного електричного струму, якщо немає акумуляторних батарей. Крім того, електролітичний конденсатор зазвичай використовується, коли велика кількість заряду повинна зберігатися в обмеженому просторі.

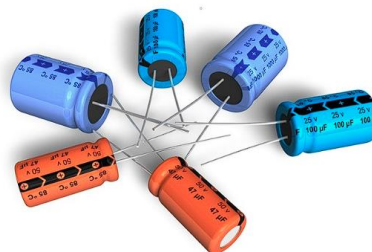


Рисунок 1.19 – Приклад електролітичних конденсаторів

Електролітичний конденсатор складається з двох тонких шарів алюмінієвої фольги – простої фольги та травленої фольги. Він побудований між двома пластинами, розділеними електролітом. Він складається з двох



клем, званих «анод» та «катод». "Окислений шар" наноситься на деякі метали. Цей шар є ізоляційним матеріалом компонента. Щоб встановити полярність двох фольг, їх анодують, що включає хімічне створення тонкого покриття з оксиду алюмінію для створення анода і відмінності його від катода. Катод та анодований анод створюються в процесі виготовлення електролітичного конденсатора, який розділений електролітом (папір, просочений електролітом).



Рисунок 1.20 – Будова електролітичного конденсатора

В електролітичних конденсаторах поверхню збільшують одним із двох способів: 1. Шляхом травлення простої фольги, отримуючи таким чином шорстку поверхню. 2. Шляхом спікання металевих гранул у пористу пігулку, сумарна поверхня гранул якої буде дуже великою.

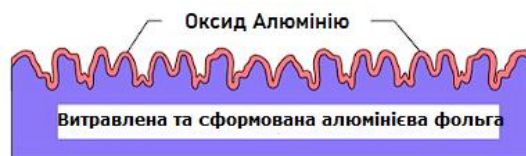


Рисунок 1.21 - Схема поперечного перерізу витравленої та сформованої фольги, що показує ступінь шорсткості поверхні

На жаль, електроліт має чималий електричний опір. Якщо розділити його на невеликі контактні ланцюжки у напрямку до дрібних поверхневих елементів оксидного шару, то опір струмопровідних шляхів до «піків» травленої поверхні буде невеликим, а шляхи в дно каналів характеризуються

опір високим опором. У вигляді діаграми це виглядає як мережа опору рисунку 1.22.

Постійна часу для найбільш глибоко розташованих конденсаторних елементів буде значно більшою, ніж у «піків». Якщо ми підемо від найдалшого розташованого шару далі по каналах, то при збільшенні частоти послідовно виходитиме все більше і більше поверхневих елементів. Таким чином електролітики мають сильну частотну залежність. Чим вищий опір провідних шляхів, тим більшими будуть постійні часу елементів і сильнішою буде частотна залежність. Оскільки опір електроліту більш менш залежить від температури, це буде відбиватися на температурній і частотній залежності, що ми побачимо на прикладі опису характеристик різних типів.

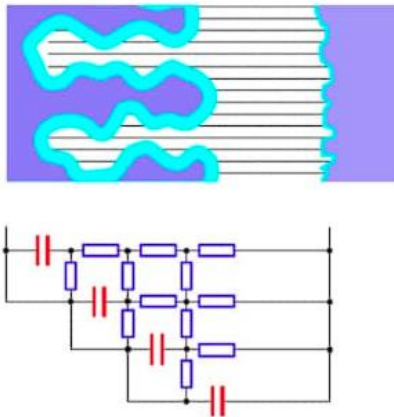


Рисунок 1.22 - Опір електроліту, показаний у вигляді резистивної мережі в протравленій фользі

Також більшість пошкоджень електролітичного конденсатора є наслідком звичайної несправності: випаровування або витік електроліту.

Висока робоча температура є каталізатором витоку або випаровування електроліту і призводить до зменшення ємності та збільшення еквівалентного послідовного опору (ESR). Як ESR збільшується, є сильним саморозігрівом в електролітичному конденсаторі, і те ж прискорюється із застосуванням пульсуючих струмів. Локалізовані гарячі точки, що утворюються в результаті надмірного нагрівання, прискорюють старіння та відмови через знос, що в

кінцевому підсумку призводить до деградації електролітичного конденсатора. У високих випадках внаслідок самонагрівання всередині електролітичного конденсатора утворюються газу, які згодом підривають електролітичний конденсатор через вентиляційний отвір.

Витік електроліту - не єдиний вид несправності електролітичних конденсаторів. Інші види відмов електролітичних конденсаторів наведені в таблиці нижче.

Таблиця 1.4 Види відмов електролітичних кондексаторів

Режим відмови	Причини
Падіння ємності або збільшення коефіцієнта дисипації ( $\tan \delta$ ).	Хімічне псування ущільнення призводить до поступового випаровування електроліту. Цей режим відмови зменшує ємність і збільшує коефіцієнт дисипації або $\tan \delta$
Коротке замикання	При пробі діелектрика оксидного шару в електролітичних конденсаторах розвивається коротке замикання. Цей режим несправності може бути результатом надмірної прикладеної робочої напруги, зворотної напруги або пульсаційного струму.
Розімкнуте коло	Застосування надмірних механічних навантажень або надмірних електричних параметрів, таких як робоча напруга та пульсації струму, спричиняють поганий контакт або розрив ланцюга в електролітичних конденсаторах. Цьому режиму відмови передують падіння ємності та підвищення $\tan \delta$ . Відмови при розімкнутому ланцюзі в електролітичних конденсаторах залежать від прикладеної напруги та температури.
Відкритий вентиляційний отвір	Щоразу, коли виникає надмірний внутрішній тиск або самонагрівання, відкривається запобіжний отвір в електролітичному конденсаторі. Ця несправність відкритого вентиляційного отвору спричинена надмірною поданою напругою, пульсаціями струму, зворотною напругою та змінним струмом.
Збільшення струму витoku	Через старіння та зберігання струм витoku в електролітичних конденсаторах збільшується за нормальних умов застосування.

Щоб запобігти деградації електролітичних конденсаторів, спричиненій вищезазначеними видами несправностей у критичних ланцюгах, планове технічне обслуговування, заміну або заміну електролітичних конденсаторів слід планувати через регулярні проміжки часу протягом їх корисного терміну служби. Зазвичай термін корисного використання електролітичного конденсатора вказано в його паспорті. Проте прикладена напруга, температура навколишнього середовища, місцеве нагрівання, зворотна напруга, прикладені пульсаційні струми та робоча частота мають значний вплив на корисний термін служби електролітичних конденсаторів. Розуміння терміну служби електролітичного конденсатора в робочих умовах корисно для проектування схеми, а також для обслуговування схеми.

**Висновки.** Аналіз методів неруйнівного контролю дозволяє визначити ефективні стратегії для забезпечення якості продукції та безпеки експлуатації.

У контексті методів неруйнівного контролю, виявлено, що важливим є розгляд різних технік, таких як ультразвукова, рентгенівська та візійна інспекція. Кожен з цих методів має свої переваги та обмеження, і їх вибір повинен враховувати конкретні вимоги та особливості проекту.

Щодо видів конденсаторів, виявлено, що розуміння їх характеристик, таких як ємність, напруга та тип ізоляції, є вирішальним для досягнення оптимального функціонування системи. Ретельний аналіз можливостей конденсаторів дозволяє визначити, який тип буде найбільш підходящим для визначених завдань та вимог проекту.

## 2 РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАРАЩЕНОГО МЕТОДУ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

### 2.1 Постановка задачі покращення методу

У рамках магістерської роботи поставлено завдання розробки та поліпшення методу неруйнівного контролю конденсаторів з основним акцентом на скорочення часу вимірювання, підвищення точності детекції дефектів, а також розширення застосування методу для різних типів конденсаторів.

Існуючі методи неруйнівного контролю конденсаторів мають певні обмеження, такі як тривалий час проведення вимірювань та обмежена точність. Таким чином, необхідно розробити метод, який ефективно застосовується для контролю конденсаторів різних типів та розмірів, забезпечуючи при цьому мінімальний час вимірів.

Метою даного покращення методу є підвищення ефективності виробництва та забезпечення безпеки використання конденсаторів у технічних системах. У зв'язку з цим ставляться такі задачі:

Розробка алгоритму оптимізації процесу з метою зменшення часу, який витрачається на перевірку кожного конденсатора.

Використання сучасних методів обробки даних для прискорення процесу аналізу результатів вимірів.

Дослідження нових технологій та методів, що сприяють покращенню точності виявлення дефектів у структурі конденсаторів.

Аналіз та оптимізація параметрів вимірів для збільшення чутливості методу до наявності прихованих дефектів.

Дослідження різних типів конденсаторів та їх особливостей з метою адаптації методу широкого спектру промислових додатків.

Врахування факторів, що впливають на ефективність методу в різних умовах експлуатації.

Для досягнення поставлених цілей та завдань передбачається використання експериментальних досліджень, математичного моделювання, аналізу існуючих технологій та підходів у галузі неруйнівного контролю. Очікуваними результатами є розробка оптимізованого методу, здатного суттєво скоротити час проведення контролю, підвищення чутливості до дефектів, а також його універсальність для різних типів конденсаторів. Цей підхід покликаний ефективно вирішити поточні обмеження існуючих методів та підвищити загальну безпеку та ефективність виробництва у галузі електротехніки.

## 2.2 Теоретичне обґрунтування нового підходу

В рамках нового підходу до оцінки стану конденсаторів важлива увага приділяється використанню різноманітних методів неруйнівного контролю. Ці методи включають електромагнітний контроль, ультразвуковий контроль, тепловізійний контроль та рентгенівський контроль, забезпечуючи комплексний та всебічний огляд фізичних властивостей та структури конденсаторів.

Електромагнітний контроль дозволяє вимірювати електричні параметри, ультразвуковий контроль фокусується на часі проходження звукових хвиль, термовізійний контроль забезпечує візуалізацію температурних аномалій, а рентгенівський контроль надає зображення внутрішньої структури. Використання цих методів у комбінації створює великий набір даних, зафіксованих у різних вимірювальних точках конденсатора.

Термовізійний контроль, наприклад, виділяє області з підвищеною температурою, що може свідчити про можливі проблеми. Ультразвуковий контроль виявляє дефекти, такі як тріщини або включення всередині матеріалу. Рентгенівський контроль доповнює ці дані, виявляючи внутрішні неоднорідності, які б залишилися непоміченими іншими методами.

Адаптація методів неруйнівного контролю до різноманітних типів конденсаторів є комплексним і диференційованим підходом, що враховує

унікальні особливості електролітичних, плівкових, керамічних та інших конденсаторів.

Електромагнітний контроль, наприклад, орієнтується на вимірювання електричних параметрів, що дозволяє виявляти аномалії в ємності та втратах для електролітичних конденсаторів та аналізувати характеристики діелектрика для плівкових конденсаторів.

Ультразвуковий контроль знаходить своє застосування у виявленні внутрішніх дефектів, таких як тріщини, особливо у структурі керамічних конденсаторів, з урахуванням їх різної щільності та структури.

Тепловізійний контроль, сфокусований на виявленні перегрівів і аномальних теплових розподілів, є актуальним для конденсаторів, що володіють високим рівнем тепловиділення, як це часто характерно для електролітичних.

Рентгенівський контроль важливий для візуалізації внутрішніх шарів та структури плівкових конденсаторів, особливо під час пошуку дефектів, прихованих під поверхнею.

Приклади ефективного використання сучасних методів неруйнівного контролю в електротехніці, аерокосмічній промисловості та автомобілебудуванні є важливим інструментом для підтвердження застосовності та перспективності запропонованого підходу.

В електротехніці застосування нових методів неруйнівного контролю суттєво покращило процеси діагностики та обслуговування електронних компонентів. Наприклад, використання термовізійного контролю в електровузлах та друкованих платах дозволяє виявляти перегрів та дефекти, які могли б залишитися непоміченими з використанням традиційних методів.

В аерокосмічній промисловості сучасні технології неруйнівного контролю стали ключовим елементом забезпечення безпеки та надійності авіаційних систем. Застосування ультразвукових методів дефектоскопії матеріалів, таких як композити, дозволяє виявляти приховані дефекти, що є критичним для запобігання відмов в умовах екстремальних навантажень.

В автомобілебудуванні, де безпека та надійність відіграють важливу роль, застосування сучасних методів неруйнівного контролю у виробничих процесах стало стандартною практикою. Наприклад, використання рентгенівського контролю для перевірки зварних з'єднань у критичних елементах підвіски дозволяє виявляти дефекти, які могли б призвести до аварійних ситуацій на дорозі.

У нафтогазовій промисловості впровадження сучасних методів неруйнівного контролю, таких як ультразвуковий контроль трубопроводів та обладнання, призвело до суттєвого покращення виявлення корозії та інших дефектів. Це дозволяє оперативно реагувати на потенційні загрози інтегрування системи, мінімізуючи ризик аварій та скорочуючи періоди технічного простою.

В галузі енергетики застосування методів термовізійного контролю у дослідженні стану енергетичного обладнання, такого як трансформатори та високовольтні лінії, дозволяє оперативно виявляти теплові аномалії, попереджаючи про можливі відмови та оптимізуючи процеси технічного обслуговування.

### 2.3 Методи вимірювання параметрів конденсаторів

Основними параметрами, що характеризують конденсатори, є їхня електрична ємність і кут втрат.

В електронних пристроях застосовуються конденсатори багатьох типів та різних призначень. Можливі значення їх ємностей лежать приблизно від 1 пФ до 1000 мкФ. В області високих і надвисоких частот об'єктами вимірювань можуть також з'явитися малі міжелектродні ємності електронних приладів і паразитні ємності між різними елементами схеми (ємності монтажу).

Допустима похибка вимірювання ємностей конденсаторів залежить від сфери застосування останніх. Місткість конденсаторів, що входять до складу коливальних систем, повинна визначатися особливо ретельно, з похибкою принаймні 1%. При виборі конденсаторів блокувальних, розділових, зв'язку



тощо зазвичай допускається значний (до 20-50%) розкид ємностей і вимірювання їх можна проводити найпростішими методами.

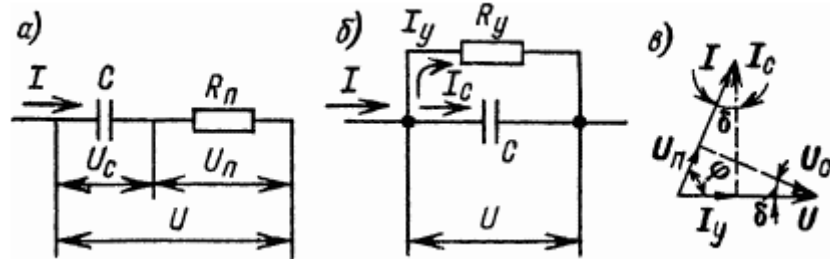


Рисунок 2.1 – Еквівалентні схеми (а, б) і векторна діаграма (в) ланцюга з конденсатором

У кожному конденсаторі, включеному до електричного ланцюга, мають місце втрати енергії, що виникають головним чином у матеріалі діелектрика, а також внаслідок недосконалості ізоляції між висновками. З урахуванням втрат еквівалентну схему конденсатора можна у двох варіантах: або як ємності  $Z$ , включеної послідовно з опором втрат  $R_n$  (рис. 2.1, а), або як тієї ж ємності  $Z$ , шунтованої опором витoku  $R_y$  (рис. 2.1, б). При переході від однієї еквівалентної схеми до іншої для перерахунку значення активного опору користуються формулою:

$$R_y = \frac{1}{((2\pi f C)^2 R_n)} \quad (2.1)$$

де  $f$  – частота струму в ланцюгу конденсатора

З векторної діаграми на рис. 2.1, справедливої для обох варіантів еквівалентних схем, слід, що в ланцюгу з конденсатором через наявність втрат фазовий зсув між струмом  $I$  і напругою  $U$  завжди менше  $90^\circ$ . Втрати в конденсаторі зазвичай характеризують кутом втрат  $\delta = 90^\circ - \varphi$ , що визначається відповідно до позначень на рис. 1 із формули:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{U_{\Pi}}{U_c} = \frac{1}{2 * \pi * f * C * R_y} \quad (2.2)$$

Втрати в конденсаторі іноді виражають коефіцієнтом потужності  $\cos$  або струмом витоку  $I_y$ , що визначається за стандартних умов. Для більшості конденсаторів втрати дуже малі ( $\operatorname{tg} \delta < 0,001$ ), тому:

$$\operatorname{tg} \delta \approx \delta \approx \sin \delta = \sin (90^{\circ} - \varphi) \quad (2.3)$$

Найбільші втрати в електролітичних та паперових конденсаторах, застосування яких здебільшого обмежується областю низьких частот.

При деяких методах вимірювання втрати в конденсаторі визначаються одночасно з вимірюванням його ємності. При цьому слід мати на увазі, що з підвищенням частоти втрати помітно зростають (що відповідає збільшенню значення  $R_{\Pi}$  і зменшенню  $R_y$ ), тоді як ємність практично не залежить від частоти. На дуже високих частотах можливе помітне зростання ємності конденсаторів, що діє (виміряна по приладах) через вплив індуктивності обкладок і проводів, що підводять.

Електролітичні конденсатори слід приєднувати до випробувального приладу з урахуванням полярності живлення. При вимірі опору витоку таких конденсаторів рекомендується відлік робити через 10 хв після їх включення під напругу, коли процес заряду вважатимуться завершеним.

Для вимірювання параметрів конденсаторів застосовуються методи вольтметра - амперметра, безпосереднього вимірювання за допомогою мікрофарадметрів, порівняння (заміщення), бруківки та резонансний.

Напруга, що додається до конденсатора при будь-якому його випробуванні, не повинна перевищувати допустимої робочої напруги. Якщо в процесі випробування конденсатор заряджається до значної напруги, необхідно виконувати його розряд після закінчення випробування (наприклад, за допомогою кнопки, включеної паралельно конденсатору).

### 2.3.1 Вимірювання ємностей методом вольтметра – амперметра

Метод вольтметра – амперметра застосовують для вимірювання порівняно великих ємностей. Живлення вимірювальної схеми зазвичай виробляють від джерела струму низької частоти:  $F = 50 \dots 1000$  Гц, тому виявляється можливим знехтувати активними втратами в конденсаторах, а також впливом реактивних параметрів вимірювальних приладів та паразитними зв'язками.

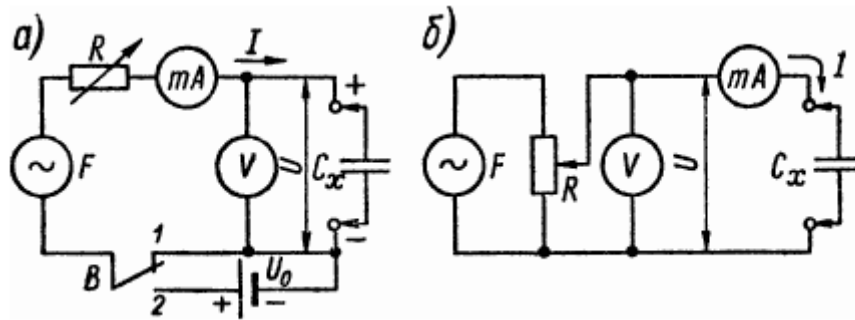


Рисунок 2.2 - Схеми вимірювання ємностей методом вольтметра-амперметра

Схема вимірів представлена у двох варіантах на рис. 2.2. Перевірений конденсатор  $C_x$  включається в ланцюг змінного струму відомої частоти  $F$ , і реостатом (або потенціометром)  $R$  встановлюють необхідне за умовами випробування або зручне для відліку значення струму  $I$  або напруги  $U$ . За показаннями приладів змінного струму  $V$  і  $mA$  можна розрахувати повний опір

$$Z = (R^2 + X^2)^{0.5} = \frac{U}{I} \quad (2.4)$$

де  $R$  і  $X = 1/(2\pi F C_x)$  - відповідно його активна та реактивна складові.

Якщо втрати малі, тобто  $R \ll X$ , то вимірювана ємність визначається формулою

$$C_x = \frac{I}{(2*\pi*F*U)} \quad (2.5)$$

Схема на рис. 2.2 а дає досить точні результати при вимірюванні великих ємностей, опір яких  $X$  значно менше вхідного опору вольтметра  $V$ . Схема на рис. 2.2 б, застосовується для вимірювання менших ємностей, опір яких в десятки і більше разів перевищує опір міліамперметра  $mA$ . Припустимо, що потрібно вимірювати ємності в межах 0,1-1 мкФ на частоті 50 Гц за наявності міліамперметра змінного струму на 3 мА. Оскільки опір цих ємностей  $X = 3200...32000$  Ом набагато більше будь-якого можливого опору міліамперметра, то вимір слід проводити за схемою на рис. 2.2 б, при напрузі живлення  $U \geq I * X = 0,003 * 3200 \approx 10$  В.

Схема на рис. 2.2 а може бути застосована і для вимірювання ємностей електролітичних конденсаторів. Якщо напруга живлення не перевищує 1-2, то вимірювання допустимо проводити при встановленні перемикача  $B$  в положення 1. При великих змінних напругах можливе пошкодження конденсаторів внаслідок розкладання електроліту. Ця небезпека усувається, якщо перемикач встановити в положення 2. При цьому послідовно з джерелом змінного струму частоти  $F$  включається джерело постійного струму, напруга на затискачах якого  $U_0$  повинна перевищувати амплітуду змінної напруги. Тоді в ланцюзі діятиме пульсуюча напруга, безпечна для конденсатора за умови правильної полярності його включення до схеми. Пульсуючу напругу можна отримати при послідовному включенні у вимірювальну схему діода. У всіх випадках вольтметр  $V$  і міліамперметр  $mA$  повинні вимірювати лише змінні складові напруги та струму, для чого вони виконуються із закритою схемою входу.

### 2.3.2 Мікрофарадметри з послідовною та паралельною схемами вимірювання

Прилади, у яких оцінка ємностей, що вимірюються, проводиться безпосередньо за шкалою стрілочного вимірювача, називаються мікрофарадметрами. Дія цих приладів може базуватися на використанні залежності струму або напруги в ланцюгу, що живиться джерелом змінного струму, від значення ємності, що вимірюється включеного в неї конденсатора. Схеми таких приладів багато в чому аналогічні схемам омметрів та мегомметрів.

Мікрофарадметр можуть мати послідовну або паралельну схему вимірювання. Послідовна схема (рис. 2.3) застосовується для вимірювання ємностей середніх значень (приблизно від 100 пФ до 10 мкФ). Напруга  $U$  частоти  $F$  підводиться від джерела до ланцюга, в якій послідовно включені конденсатор опорної ємності, випробуваний конденсатор  $C_x$  і мікро- (або мілі) амперметр змінного струму  $mA$ . Перед початком вимірювань при короткому замиканні вхідних затискачів (що еквівалентно  $C_x = \infty$ ) реостатом  $R$  встановлюють в ланцюзі мікроамперметра  $mA$  струм повного відхилення  $I_{\Pi}$ ; це забезпечується при виборі ємності опорного конденсатора.

$$C_0 \geq I_{\Pi}(2 * \pi * F * U) \quad (2.6)$$

При підключенні конденсатора  $C_x$  струм через мікроамперметр знизиться до деякого значення  $I_x$ , тим меншого, чим менше ємність  $C_x$ , що дозволяє вимірювач забезпечити шкалою з відмітками значень вимірюваних ємностей. Градуовальна характеристика приладу не залежить від частоти та форми кривої напруги живлення та приблизно визначається формулою:

$$\frac{I_x}{I_{\Pi}} \approx \frac{C_x}{(C_0 + C_x)} \quad (2.7)$$

Ідентичною формулою, що визначає градуувальну характеристику паралельних схем омметрів. Аналогічно змінюється і похибка вимірів: найменша у середині шкали, вона зростає її краях. Середині шкали відповідає ємність  $C_x = 3$ , а діапазон вимірювань обмежується значеннями 0,1 і 10 С. Необхідна напруга живлення визначається за умови:

$$U \geq \frac{I_n}{2\pi F C_0} \quad (2.8)$$

Наприклад, при  $I_n = 1$  мА,  $F = 50$  Гц і  $C_0 = 20000$  пФ джерело живлення має забезпечувати напругу  $U \geq 160$  В, але якщо частота коливань джерела  $F = 1000$  Гц, то потрібна напруга живлення знижується до 8-10 В.

Для вимірювання ємностей у широкому діапазоні мікрофарадметр повинен мати кілька меж вимірювань, які доцільно задавати середніми значеннями шкали при перехідному коефіцієнті  $N$ , кратному 10.

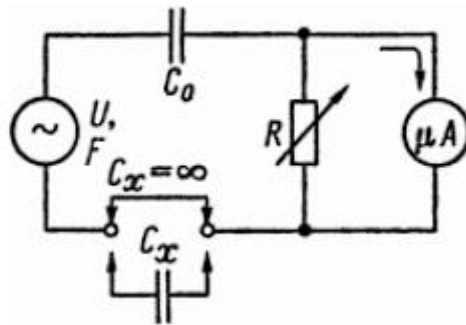


Рисунок 2.3 – Послідовна схема мікрофарадометра з вимірювачем струму

Найбільш зручним джерелом живлення мікрофарадметра є мережа змінного струму частотою 50 Гц, що дозволяє за допомогою малогабаритного трансформатора отримати будь-яку потрібну напругу. Високе значення останнього необхідно лише в межах із найменшими ємностями  $C_x$ . Якщо обмежити максимальну напругу живлення значенням 200 В, то за наявності

випрямного мікроамперметра  $mA$  на  $100 \mu A$  можна отримати, згідно (3), ємність  $i$   $1600 \text{ пФ}$ . Високовольтне живлення допустимо включати лише після розряду конденсатора і приєднання до схеми випробуваного конденсатора. Для замикання вхідних затискачів для встановлення стрілки вимірювача на позначку « $\infty$ » бажано використовувати кнопку. Конденсатори  $C$  і  $C_x$  повинні бути розраховані на робочу напругу, не меншу за випробувальний. Для запобігання пошкодженню вимірювача у разі пробою конденсатора, останній доцільно складати з двох послідовно включених конденсаторів, кожен ємністю  $2C$ . Можливе також включення в ланцюг живлення обмежувального резистора з опором, в 5-10 разів меншим ємнісного опору конденсатора.

Для розширення діапазону вимірювань у бік великих значень  $Z$  початку зазвичай зменшують  $N$  раз напруга живлення (поки воно не досягне одиниць вольт), використовуючи відведення від обмоток силового трансформатора або за допомогою резистивного дільника напруги. Перехід до меж з ще більшим значенням може супроводжуватися зниженням чутливості індикатора за допомогою його шунтування, подібно до того, як це робиться в багатограничних омметрах. Верхня межа вимірюваних ємностей зазвичай не перевищує  $1-10 \text{ мкФ}$ , оскільки при опорі конденсатора, порівнянним з внутрішнім опором індикатора і ланцюга живлення, сильно зростає похибка вимірювань.

При розширенні діапазону вимірювань у бік малих значень для отримання прийнятних значень напруги живлення  $U$  схему доводиться живити від внутрішнього або зовнішнього генератора - джерела напруги підвищеної частоти  $F$  в тисячі герц. При цьому необхідно вживати заходів щодо усунення впливу власних ємностей схеми та монтажу.

Схема мікрофарадметра за рис. 2.3 буде діяти і при заміні опорного конденсатора на опорний резистор  $R_0$ . У цьому випадку обране середнє значення  $Z$  шкали вимірювання ємностей досягатиметься під час опору

$$R_0 \approx \left( \frac{4 \cdot U^2}{I^2 - 1} \right)^{0.5} \quad (2.9)$$

$$\frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot F \cdot C)^2}$$

Такий прилад можна одночасно використовувати і як омметр із послідовною схемою для наближеного виміру (на частоті F) активних опорів за умови виконання відліку за спеціальною шкалою, подібною до шкали ємностей, але зворотного розташування.

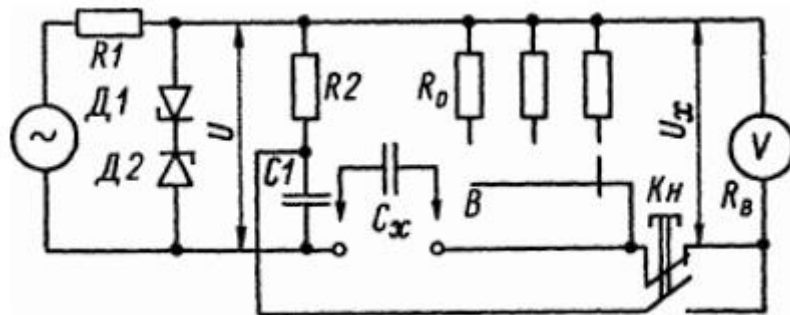


Рисунок 2.4 - Послідовна схема багатограничного мікрофарадметра з вимірювачем напруги

За наявності електронного вольтметра змінного струму з великим вхідним опором R за основу мікрофарадметра може бути прийнята схема, наведена на рис. 4. Змінна напруга U, стабілізована ланцюжком R1, Д1, Д2 і дорівнює приблизно межі вимірювання  $U_p$  вольтметра V при замиканні вхідних затискачів впливає на вольтметр. Регулюванням чутливості останнього домагаються відхилення його стрілки вимірювача до кінця шкали. При включенні в схему випробуваного конденсатора Cx утворюється дільник напруги  $R_0, C_x$ , з якого до вольтметра підводиться напруга  $U_x$ , тим менше, чим менше ємність Cx.

Мікрофарадметр у розглянутому режимі роботи має крайні позначки шкали ємностей «0» і «∞». Однак якщо використовувати в приладі чутливий мілівольтметр з межею вимірювання  $U_p \ll U$ , що допускає короткочасне випадкове навантаження до напруги, рівної U, то верхні межі вимірювання



приладу можуть бути обмежені обраними значеннями ємностей  $C_p$ , яким повинні відповідати опору:

$$R_0 \approx \frac{U_p}{U \cdot 2 \cdot \pi \cdot F \cdot C_p} \quad (2.10)$$

При цьому значно розширюється робоча ділянка шкали. В даному випадку при допустимому опорі  $R_0 = 1 \text{ МОм}$ , частоті  $F = 50 \text{ Гц}$  і відношенні напруги  $U_p/U = 1/30$  отримуємо  $C_p \approx 100 \text{ пФ}$ , що дозволяє проводити вимірювання ємностей від  $10 \text{ пФ}$  і більше. Якщо порядок вимірюваної ємності  $C_x$  невідомий, то перемикачем слід спочатку встановити межу вимірювань найбільших ємностей, при якому можливе навантаження вольтметра обмежується через зростання падіння напруги на резисторі  $R_1$ .

У мікрофарадметрі з обмеженими межами виміру перед початком вимірів необхідно проводити калібрування приладу. У схемі на рис. 4 для цієї мети служить ланцюжок  $R_2 \text{ } C_1$ . При натисканні кнопки  $K_n$  з конденсатора  $C_1$  на вхід вольтметра подається напруга, при якому стрілка його вимірювача повинна відхилитися до кінця шкали (або до певної мітки на шкалі), чого досягають регулятором чутливості. Зазвичай беруть  $R_2$  рівним опорі  $R_0$  однієї з меж вимірювання, а  $C_1$  рівної ємності  $C_p$  тієї ж межі.

На рис. 2.5 а представлений один з варіантів паралельної схеми мікрофарадметра. При вільних вхідних затискачах (що еквівалентно ємності  $C_x = 0$ ) регулюванням чутливості вольтметра  $V$  домагаються відхилення його стрілки вимірювача до кінця шкали. Включення в схему конденсатора  $C_x$  призводить до того, що напруга на вольтметрі, спочатку рівна  $U_p$ , знижується до значення  $U_x$ , тим меншого, чим більша ємність  $C_x$ . Градуовальна характеристика мікрофарадметр визначається формулою:

$$\frac{U_x}{U_p} \approx \frac{C_0}{C_0 + C_x} \quad (2.11)$$

Аналогічною формулою, що визначає градуувальну характеристику послідовних схем омметрів.

Вхідний опір вольтметра  $R_B$  і частота струму живлення  $F$  обмежують вибір опорної ємності конденсатора, що визначає середнє значення шкали, умовою:

$$C_0 \geq \frac{1.5}{F * R_B} \quad (2.12)$$

При високочастотному джерелі живлення можливе зниження допустимих значень до сотень пікофарад, проте похибка вимірювань може виявитися великою, якщо не врахувати вхідну ємність вольтметра.

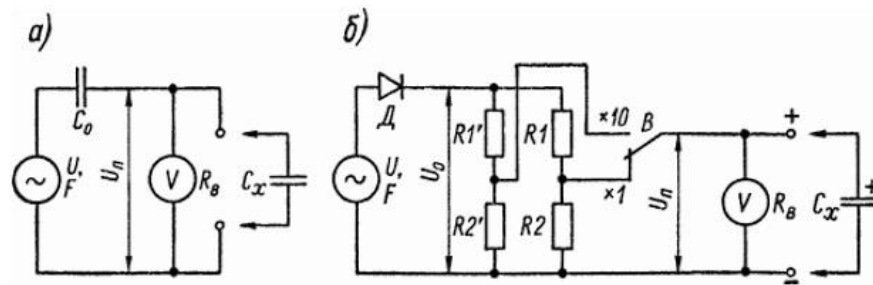


Рис. 2.5 – Паралельні схеми мікрофардометрів

Для виміру ємностей електролітичних конденсаторів придатна схема на рис. 2.5, б. Завдяки включенню діода  $D$  на ділянці напруги  $R1$ ,  $R2$  діє пульсуюча напруга  $U_0$ . При  $C_x = 0$  з резистора  $R2$  на вольтметр  $V$  (він може бути порівняно низькоомним, наприклад, випрямляючим) подається напруга повного відхилення  $U_n$ . Увімкнення конденсатора  $C_x$  призводить до зниження напруги на вольтметрі відповідно до формули (5). При обраному середньому значенні шкали ємностей і частоті  $F = 50$  Гц необхідні значення опорів ділянки напруги визначаються формулами:

$$R1 = \frac{U_0}{U_n * 180 * C_0} \quad (2.13)$$

$$R2 = R1 * U_{\pi}(U_0 - U_{\pi}) \quad (2.14)$$

Зміна меж вимірювань здійснюється за допомогою використання кількох ділників напруги з однаковим коефіцієнтом поділу  $U/U_a$ , але різними значеннями опорів  $R1$  і  $R2$ . Вольтметр змінного струму  $V$  повинен мати закриту схему входу, інакше напругу на нього слід подавати через електролітичний конденсатор великої ємності.

Усі розглянуті схеми мікрофарадметрів дозволяють вимірювати ємності конденсаторів із похибкою 5-10%, а іноді й більше. Виконати їх шкалу на основі розрахунку градуювальної характеристики не завжди вдається внаслідок впливу різних факторів, що важко враховуються, наприклад внутрішніх опорів джерела живлення та вимірювальних приладів, нелінійності шкали напруг вольтметра тощо. допусками за ємністю трохи більше 5%.

### 2.3.3 Мікрофарадометри з рівномірною шкалою

Мікрофарадметр з рівномірною шкалою може бути виконаний за схемою, аналогічною схемам ємнісних частотомірів, в принципі, відрізняючись від останніх лише тим, що об'єктом вимірювань є не частота, а ємність. Дія таких приладів базується на вимірі середнього значення струму заряду або розряду конденсатора, що перевіряється, що перезаряджається напругою відомої частоти.

На рис. 2.6 а наведена схема вимірювального блоку мікрофарадметра, що живиться імпульсною напругою  $u$  прямокутної форми. Під час дії імпульсу через діод  $D$  відбувається заряд конденсатора  $C_x$  до максимальної напруги  $U_m$ . В інтервалі між імпульсами конденсатор розряджається через вимірювач (магнітоелектричний мікроамперметр)  $I$  до початкової напруги  $U_{\pi}$ . У режимі, що встановився, при частоті повторення вхідних імпульсів  $f$  і їх амплітуді  $U_{\pi} = U_m - U_{\pi}$  середнє значення струму, що протікає через вимірювач  $I_x = C_x U_{\pi} f$ .

При фіксованих значеннях  $U_{\text{п}}$  і  $f$  вимірювач можна забезпечити рівномірною шкалою з відліком у значеннях  $C_x$  відповідно до формули:

$$C_x = \frac{I_x}{U_{\text{п}} f} \quad (2.15)$$

Граничне значення вимірюваних ємностей

$$C_{\text{п}} = \frac{I_i}{U_{\text{п}} f} \quad (2.16)$$

де  $I_i$  - струм повного відхилення вимірювача. Для згладжування пульсацій і усунення коливань стрілки вимірювача служить конденсатор, опір якого при частоті  $f$  повинен бути значно меншим опору  $R_i$  вимірювача.

Результати не зміняться, якщо вимірник увімкнути в ланцюг зарядного струму послідовно з діодом Д2 (рис. 2.6, б); тоді розрядний струм конденсатора  $C_x$  замикатиметься через діод Д1. При вимірі малих ємностей іноді застосовують двонапівперіодну схему включення вимірювача (рис. 2.6, в). В цьому випадку через вимірювач протікають і зарядний і розрядний струми, що дозволяє отримати необхідну межу вимірювань при напрузі  $U_{\text{п}}$  або частоті  $f$ , удвічі менших, ніж у схемах з однополуперіодним включенням вимірювача.

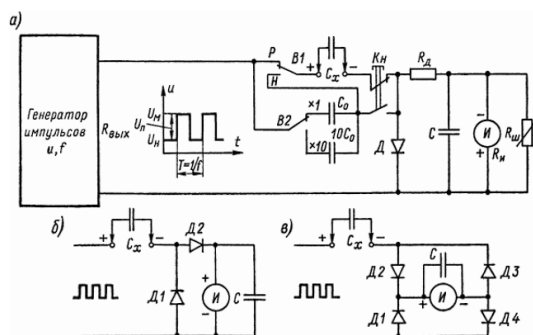


Рис. 2.6 – Схемотехнічна побуда засобу мікрофарадометру із рівномірною шкалою

Межі вимірювань приладу задаються значеннями  $C_{\Pi}$  та для їх забезпечення при перемиканні меж змінюють частоту повторення імпульсів джерела живлення, що визначається формулою

$$f = I_{\Pi}(U_{\Pi}C_{\Pi}) \quad (2.17)$$

Перед початком вимірювань на кожній межі повинно проводитись калібрування мікрофарадметра, для чого до нього натисканням кнопки  $K_{\Pi}$  приєднують конденсатор ємністю  $Z = C_{\Pi}$  (рис. 6, а); при цьому домагаються відхилення стрілки вимірювача до кінця шкали за допомогою плавного регулювання частоти  $f$ , амплітуди імпульсів  $U_{\Pi}$  або чутливості вимірювача (наприклад, за допомогою шунтуючого реостату  $R_{\Pi}$ ). Оскільки шкала приладу рівномірна, то похибка вимірювання ємностей переважно визначається похибкою підбору опорної ємності  $Z$ , відхилення якої від необхідного номіналу ( $C_{\Pi}$ ) має перевищувати 1...5%.

Для отримання правильних результатів вимірювань необхідно, щоб за один період вхідної напруги та конденсатор  $C_{\Pi}$  встигав повністю зарядитися та розрядитися (у межах напруг  $U_{\Pi} - U_{\Pi}$ ). Найлегше це забезпечується при прямокутній формі вхідних імпульсів та належному виборі частоти їх повторення  $f$ .

Як відомо, в ланцюзі, що складається з елементів  $R$  і  $C$ , тривалість заряду (розряду) конденсатора до значення прикладеного до цього ланцюга постійної напруги визначається постійної часу  $\tau = RC$  і практично не перевищує  $5\tau$ . Для того, щоб заряд (розряд) закінчувався протягом напівперіоду  $T/2$  напруги частоти  $f$ , необхідно виконання умови:

$$5RC = 5T \leq \frac{T}{2} = \frac{1}{2*f} \quad (2.18)$$

яке задовольняється при частоті:

$$f \leq \frac{1}{10 \cdot RC} \quad (2.19)$$

Приймаючи максимально можливий опір ланцюгів заряду та розряду  $R = 10 \text{ кОм}$  (з урахуванням вихідного опору  $R_{\text{вих}}$  генератора імпульсів), отримуємо практичну формулу для вибору частоти повторення імпульсів (у кілогерцах):

$$f \leq \frac{10^4}{C_{\text{п}}} \quad (2.20)$$

(де  $C_{\text{п}}$  - у пікофарадах). В останній умові часто набувають знак рівності. Тоді верхнім межам вимірювань  $C_{\text{п}}$  - 100, 1000, 10 000 пФ і 0,1 мкФ відповідно відповідатимуть частоти  $f = 100, 10, 1$  і 0,1 кГц.

Мікрофарадметри такого типу зазвичай мають верхні межі вимірювань  $C_{\text{п}}$  не менше 100 пФ через труднощі генерування прямокутних імпульсів з високою частотою повторення і впливу паразитних зв'язків. Труднощі виникають і при розширенні діапазону вимірів у бік великих ємностей. Наприклад, при виборі верхніх значень меж  $C_{\text{п}} = 1$  і 10 мкФ, згідно з умовою (8), потрібно живити схему імпульсами з частотами повторення відповідно 10 і 1 Гц, проте при цьому відлік вимірювача стає неможливим через сильні вібрації його стрілки, які не вдається усунути збільшенням ємності конденсатора  $C$ . При вимірі великих ємностей вимірювальну схему зазвичай живлять імпульсами з частотою повторення 50 Гц (їх легко одержати перетворенням напруги мережі змінного струму); одночасно для виконання умови (7) зменшують постійні часу ланцюгів заряду та розряду за допомогою вибору джерела імпульсів з дуже малим вихідним опором (десятки Ом) та шунтування вимірювача. Останнє веде до зростання розрядного струму, що викликає відхилення стрілки вимірювача на всю шкалу, до кількох міліампер, що полегшує виконання рівності (6). Комутація ланцюгів заряду та розряду повинна автоматично керуватися вхідними імпульсами.

Крім рівномірної шкали ємностей, мікрофарадметри можуть мати нерівномірну шкалу з діапазоном показань від 0 до  $\infty$ , подібну до шкал паралельних схем омметрів. Характер шкали (рівномірна – Р, нерівномірна – Н) у схемі на рис. 6, а визначається установкою перемикача В1. У положенні останнього «Н» випробуваний конденсатор  $C_x$  включається послідовно з опорним конденсатором, ємність якого задає межу вимірювань приладу і приблизно відповідає середині його нелінійної шкали.

Рівномірна шкала вимірювання ємностей може бути отримана деякими іншими методами. Так, якщо до виходу мультівібратора підключити диференціюючий ланцюжок  $R, C_x$ , то середня напруга імпульсів однієї полярності, що знімаються з резистора  $R$ , виявляється пропорційним ємності  $C_x$ . Для роботи в такому приладі потрібен чутливий мілівольтметр постійного струму. Межі вимірювання можуть задаватися опорами резистора  $R$ . При частоті повторення імпульсів  $f = 100$  кГц були отримані верхні межі вимірювання ємностей  $C_p = 10$  і  $100$  пФ.

#### 2.3.4 Вимірювання ємностей методом порівняння (заміщення)

Даний метод базується на порівнянні дії, що надається вимірюваною ємністю  $C_x$  і відомою ємністю на режим вимірювальної схеми.

Найпростіша схема вимірювань, у якій ємності  $C_x$  і  $Z$  порівнюються за значенням їх опору змінному струму, наведено на рис. 7. При включенні конденсатора  $C_x$  потенціометром  $R$  встановлюють у ланцюзі струм, зручний для відліку або контролю за міліамперметром змінного струму  $mA$  або іншим низькоомним індикатором. Потім замість конденсатора  $C_x$  приєднують до схеми магазин ємностей або зразковий (опорний) конденсатор змінної ємності і зміною його ємності домагаються колишнього показання індикатора. Це буде мати місце при  $Z = C_x$ . Похибка вимірювань залежить від чутливості індикатора та похибки відліку ємності  $Z$ ; вона може бути отримана рівною приблизно 1% і менше.

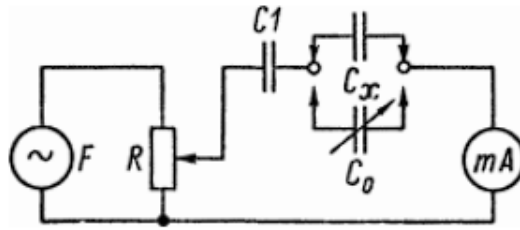


Рис. 2.7 – Схема вимірювання ємностей

При вимірюванні ємностей понад методом порівняння 5000 пФ схему вимірювань можна живити від мережі змінного струму частотою 50 Гц. Для вимірювання менших ємностей необхідний генератор, що працює на високих частотах. У всіх випадках для забезпечення безпеки індикатора в ланцюг слід включати конденсатор ( $C_1$ ) або резистор.

Метод порівняння у різних варіантах широко застосовується у мостових та резонансних вимірювачах ємностей. Він може бути реалізований і в мікрофарадметрах, розглянутих у попередніх параграфах, за значного зниження похибки вимірювань.

### 2.3.5 Вимірювальні мости змінного струму

Для вимірювання параметрів конденсаторів та котушок індуктивності широко застосовуються врівноважені мости змінного струму.

У загальному випадку плечі вимірювального моста змінного струму (рис. 2.8) мають комплексні опори  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$  і  $Z_4$ , один з яких, наприклад  $Z_4$ , є об'єктом вимірювань. Живлення моста здійснюється від джерела змінного струму частоти  $F$ , напруга якого підводиться безпосередньо або через трансформатор  $Tr$  до однієї з діагоналей моста. В іншу діагональ включається індикатор нуля змінного струму  $ИН$ .



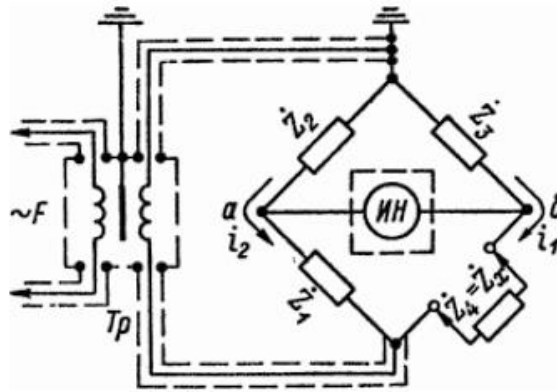


Рис. 2.8 - Схема мосту змінного струму

Так само як і в мостах постійного струму, процес виміру зводиться до врівноваження моста змінного струму, що характеризується відсутністю різниці потенціалів між вершинами а і б; для цього необхідно, щоб падіння напруги в плечах  $Z_1$  і  $Z_4$  (а також у плечах  $Z_2$  і  $Z_3$ ) дорівнювали по амплітуді і збігалися по фазі. Рівновага досягається при виконанні двох умов:

- 1) рівність творів модулів повних опорів протилежних плечей, тобто.

$$Z_4 Z_2 = Z_1 Z_3 \quad (2.21)$$

- 2) рівності сум фазових кутів цих плечей, тобто.

$$\varphi_4 + \varphi_2 = \varphi_1 + \varphi_3 \quad (2.22)$$

Якщо плече моста має активний  $R$  і реактивний (ємнісний або індуктивний)  $X$  опори, що діють послідовно, то модуль повного опору плеча:

$$Z = (R^2 - X^2)^{0.5} \quad (2.23)$$

а його фазовий кут визначається з формули:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X}{R} \quad (2.24)$$

Для чисто активних плечей ( $X=0$ ) фазовий кут  $\varphi=0$ ; для чисто ємнісних та індуктивних плечей ( $R = 0$ ) відповідно  $\varphi = -90^\circ$  та  $\varphi = +90^\circ$ . Якщо опір плеча має змішаний (комплексний) характер, фазовий кут  $|\varphi| < 90^\circ$ .

Якщо опори  $R$  і  $X$  представляються в паралельному з'єднанні, модуль повного опору плеча:

$$Z = \frac{1}{\left(\frac{1}{R^2} + \frac{1}{X^2}\right)^{0.5}} \quad (2.25)$$

а фазовий кут  $\varphi$  знаходиться з формули:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{R}{X} \quad (2.26)$$

У цьому випадку кут  $\varphi = 0$  за відсутності реактивного опору ( $X = \infty$ ) та  $\varphi = +90^\circ$  за відсутності активного опору ( $R = \infty$ ).

Для одночасного виконання обох умов рівноваги доводиться регулювати два параметри відомих плечей моста; при цьому виявляється можливим визначити два параметри досліджуваного плеча, наприклад, активну та реактивну складові його повного опору.

У вимірювальних мостах змінного струму уникають застосування котушок індуктивності (якщо, звичайно, останні не є об'єктами вимірювань), оскільки вони мають помітний активний опір і сприйнятливі до магнітних полів; крім того, за наявності сталевго осердя індуктивність котушки не є стабільною. Як регульовані елементи в мостах використовуються змінні резистори і конденсатори, а також магазини опорів і ємностей.

Вимірювальні мости, умови рівноваги яких залежить від частоти, називаються частотно-зависимими; вони використовуються для вимірювання частоти та як фільтри. При інших вимірах застосовуються частотно-незалежні мости, умови рівноваги яких частота не входить. Однак через наявність паразитних ємнісних зв'язків між елементами моста і по відношенню до

навколишніх предметів міст, врівноважений для струму основної частоти, може виявитися неуврівноваженим для гармонійних складових струму, внаслідок чого показання індикатора не спадатимуть до нуля, що підвищує похибку вимірювань. Тому живлення мостів бажано виробляти від джерел синусоїдальної напруги; для зменшення впливу гармонік в ланцюзі живлення чи індикатора іноді ставлять фільтр нижніх частот.

У найпростіших мостах, що живляться джерел звукової частоти, індикаторами нуля часто служать головні телефони. Міст врівноважують за мінімальною чутністю тону основної частоти, що зменшує помилку вимірювань, обумовлену дією гармонік, і дозволяє знизити вимоги до генератора живлення.

У вимірювальних мостах промислового виготовлення як індикатори нуля застосовують випрямні або електронні мілівольтметри, а також осцилографічні індикатори на малогабаритних електроннопроменевих трубках; останні на відміну від інших індикаторів мають фазочутливість, що дозволяє визначати напрямок, в якому слід проводити врівноважування моста.

Достоїнствами врівноважених мостів змінного струму є мала похибка вимірювання, що не перевищує кращих зразках 1%, широкі межі вимірювань, можливість універсального застосування для вимірювання різних електричних величин. Головним їх недоліком є складність та тривалість процесу врівноважування. В останньому відношенні певні переваги мають неуврівноважені та автоматичні мости змінного струму.

У неуврівноважених мостах змінного струму амплітуда та фаза вихідної напруги на затискачах індикаторної діагоналі залежать як від модуля, так і складу об'єкта вимірювань  $Z_x$ . При порівняно малому відхиленні стану рівноваги активна і реактивна складові вихідної напруги виявляються приблизно пропорційними збільшенням аналогічних складових комплексного опору  $Z_x$  щодо тих значень, при яких міст врівноважений  $Z_a$  допомогою двох фазочутливих систем вдається розділити складові вихідної напруги, зрушені по фазі на  $90^\circ$ , які потім вимірюються двома індикаторами; звіт за шкалами

останніх проводиться відповідно у значеннях активної та реактивної складових опору  $Z_x$ .

В автоматичних мостах змінного струму виділені фазочутливими системами складові вихідної напруги приводять в дію два електродвигуни, які за допомогою приводів впливають на елементи регулювання мостової схеми до досягнення стану рівноваги.

### 2.3.6 Мостовий метод вимірювання параметрів конденсаторів

Мости, що застосовуються для вимірювання параметрів конденсаторів, поділяються на магазинні та реохордні (лінійні). Найпростіший (однограничний) магазинний міст, придатний для вимірювання ємностей в десятки і сотні пікофарад, може бути складений з чотирьох конденсаторів: вимірюваного, змінного зі шкалою ємностей (у суміжному плечі) і двох постійних з однаковою ємністю (сотні пікофарад). При використанні як індикатора головних телефонів джерелом живлення моста може бути радіотрансляційна мережа. Широкодіапазонні магазинні мости складніші за реохордні, проте вони забезпечують меншу похибку вимірювання і можуть мати рівномірні відлікові шкали. Діапазон ємностей, що вимірюються мостовим методом, лежить приблизно в межах від 10 пФ до 10...30 мкФ.

На рис. 2.9 а наведена схема багатограничного магазинного мосту. Його врівноважують за допомогою конденсатора змінної ємності  $C_1$  та змінного резистора  $R_1$ . Застосовуючи до цієї схеми умову рівноваги (9), отримуємо:

$$R_2 * (R_x^2 + \frac{1}{2*\pi*F*C_x})^{0.5} = R_3 * (\frac{R_1^2+1}{(2*\pi*F*C_1)^2})^{0.5} \quad (2.27)$$

Враховуючи, що  $\varphi_2 = \varphi_3 = 0$ , другу умову рівноваги можна записати у вигляді рівності  $\varphi_x = \varphi_1$  або  $\text{tg } \varphi_x = \text{tg } \varphi_1$  або, згідно з формулою:

$$\frac{1}{2*\pi*F*C_x*R_x} = \frac{1}{2*\pi*F*C_1*R_1} \quad (2.28)$$

Вирішуючи спільно наведені вище рівняння, знаходимо:

$$C_x = C_1 \left( \frac{R_2}{R_3} \right) \quad (2.29)$$

$$R_x = R_1 \left( \frac{R_3}{R_2} \right) \quad (2.30)$$

При фіксованому відношенні опорів плечей  $R_2/R_3$  конденсатор  $C_1$  і резистор  $R_1$  можна забезпечити шкалами з відліком відповідно значення ємностей  $C_x$  і опорів втрат  $R_x$ . Розширення діапазону вимірювань досягається застосуванням групи резисторів  $R_3$  (або  $R_2$ ) різних номіналів, які зазвичай розрізняються в 10 разів. Міст врівноважується швидко, оскільки регулювання, що здійснюються конденсатором  $C_1$  та резистором  $R_1$ , взаємозалежні. Якщо міст призначається для вимірювання ємностей менших 0,01 мкФ, для яких втрати на низьких частотах дуже малі, то резистор  $R_1$  може бути відсутнім.

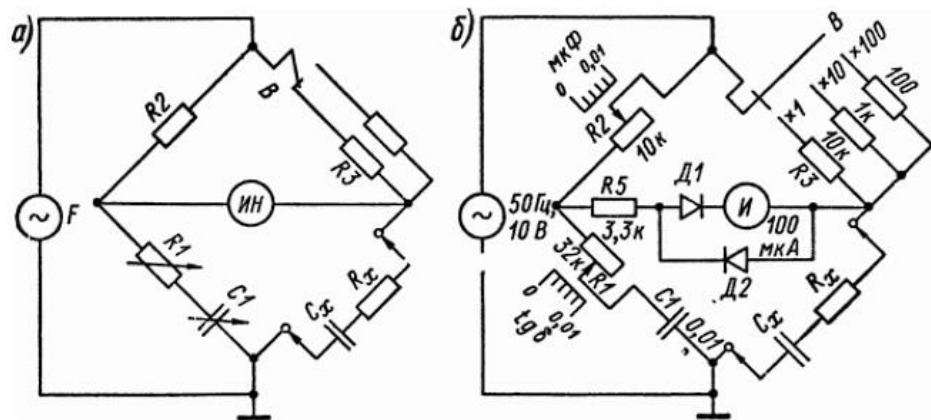


Рис. 2.9 - Схеми магазинних мостів для вимірювання параметрів конденсаторів

З метою спрощення конструкції в деяких вимірювальних мостах конденсатор  $C_1$  береться постійної ємності, а як регульовані елементи використовуються два змінних резистора, наприклад  $R_1$  і  $R_2$  (рис. 2.9, б). З формул (15) і (16) випливає, що обидва регулювання такого моста виявляються взаємопов'язаними, тому його врівноваження, контрольоване за показаннями

випрямного індикатора, повинно здійснюватися способом послідовного наближення до мінімуму шляхом зміни змін опорів  $R_1$  і  $R_2$ . Значення ємностей  $C_x$  знаходяться за шкалою резистора  $R_2$  з урахуванням множника, що визначається установкою перемикача  $B$ . Оскільки безпосередня оцінка опорів втрат  $R_x$  виявляється неможливою, відлік за шкалою резистора  $R_1$  зазвичай виконується в значеннях тангенсу кута втрат:

$$\operatorname{tg}\sigma = 2 * \pi F * C_x * R_x = 2 * \pi * F * C_1 * R_1 \quad (2.31)$$

який за фіксованої частоті  $F$  однозначно визначається значенням опору  $R_1$ . У справедливості останньої формули легко переконатися, якщо перемножити відповідно ліві та праві частини рівностей (15) та (16).

Прості вимірювачі ємностей виконуються за схемою реохордного мосту, в якому зазвичай передбачається можливість вимірювання та опорів, а інколи й індуктивностей. Схема універсального реохордного моста наведено у статті Вимірювання параметрів котушок індуктивності на рис. 2.5.

Для виключення впливу паразитних зв'язків та похибок самого моста мостовий метод вимірювання ємностей часто поєднують із методом заміщення. При цьому до вхідних затискачів моста підключають магазин ємностей (або опорний конденсатор змінної ємності) і при якомусь значенні його ємності  $C_1$ , що явно перевищує ємність  $C_x$ , врівноважують міст. Потім досліджуваний конденсатор приєднують паралельно магазину та зменшенням ємності останнього до деякого значення  $C_2$  знову врівноважують міст. Очевидно, що ємність, що вимірюється  $C_x = C_1 - C_2$ .

### 2.3.7 Резонансні вимірювачі ємностей

Крім вимірювання частоти електричних коливань резонансні методи широко застосовуються для вимірювання малих ємностей та індуктивностей, добротності, власної або резонансної частоти налаштування та інших параметрів радіодеталей та коливальних систем.

Резонансна схема вимірювання ємностей (рис. 2.10) зазвичай включає генератор високої частоти, з контуром якого LC слабо зв'язується індуктивно (або через ємність) вимірювальний контур, що складається з опорної котушки індуктивності  $L_0$  і випробуваного конденсатора  $C_x$ . Зміною ємності конденсатора  $C$  генератор налаштовують в резонанс з власною частотою  $f_0$  вимірювального контуру за екстремальними показаннями індикатора резонансу, наприклад електронного вольтметра  $V$ . При відомій частоті налаштування генератора  $f_0$  вимірювана ємність визначається формулою:

$$C_x = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 L_0} \approx \frac{0.0253}{f_0^2 L_0} \quad (2.32)$$

При фіксованому значенні  $L_0$  конденсатор можна забезпечити шкалою з відліком у значеннях ємностей  $C_x$ .

Межі вимірювань ємностей визначаються значенням індуктивності  $L$  і діапазоном частот генератора. Наприклад, при  $L_0 = 100$  мкГ і діапазоні генератора 160-3500 кГц прилад вимірюватиме ємності від десятків пікофарад до сотих часток мікрофарад. Для розширення меж вимірювань ємностей при обмеженому частотному діапазоні генератора застосовують кілька змінних котушок  $L_0$  різної індуктивності, а також включають конденсатори, що випробовуються, в вимірювальний контур послідовно з конденсаторами відомої ємності. Ємності більше 0,01-0,05 мкФ резонансним методом зазвичай не вимірюються, так як на низьких частотах резонансні криві коливальних контурів стають тупими, що ускладнює фіксацію резонансу.

Як індикатори резонансу використовують чутливі високочастотні прилади, що реагують на струм або напругу, що діють у вимірювальному контурі, наприклад електронні вольтметри зі стрілочним або електронно-світловим індикатором, електроннопроменеві осцилографи, термоелектричні прилади і ін.

Похибка вимірювання ємностей резонансним методом досягає 5-10% через вплив паразитних зв'язків, деякого впливу контуру генератора на параметри вимірювального контуру, труднощі точної фіксації стану резонансу; вона також залежить від стійкості частоти генератора та похибки її вимірювання.

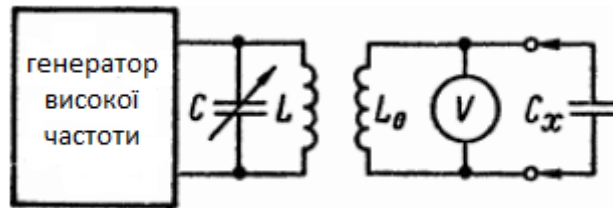


Рис. 2.10 - Схема вимірювання ємностей резонансним методом

При поєднанні резонансного методу з методом заміщення усувається залежність результату вимірювання ємностей від точності вимірювання частоти генератора та паразитних зв'язків, завдяки чому похибка вимірювань можна знизити до 1% і менше. Для цього до вимірювального контуру (рис. 10) підключають опорний конденсатор змінної ємності  $C$  і при максимальній його ємності  $C_0$  налаштовують генератор на резонансну частоту контуру. Потім паралельно конденсатору приєднують конденсатор  $C_x$ ; порушений резонанс відновлюють при постійному налаштуванні генератора за допомогою зменшення ємності до деякого значення  $C_2$ . Вимірювана ємність, очевидно, визначається формулою  $C_x = C_1 - C_2$ .

Верхня межа вимірюваних подібним методом ємностей дорівнює різниці між максимальною  $C_m$  і початковою знімками конденсатора  $C$ . Конденсатори, ємність яких перевищує значення  $C_m - C_n$ , можна підключати до контуру послідовно з постійним конденсатором відомої ємності  $C_x$ . При цьому порядок вимірювань залишається незмінним, але вимірювана ємність підраховується за формулою:



$$C_x = \frac{C_1(C_{01}-C_{02})}{(C_1-C_{01}+C_{02})} \quad (2.33)$$

Різні варіанти резонансних методів реалізуються у спеціальних вимірювальних приладах або за допомогою малогабаритних приставок до типової, що має частотні шкали, радіоапаратури (до останніх відносяться високочастотні вимірювальні генератори, радіоприймачі тощо).

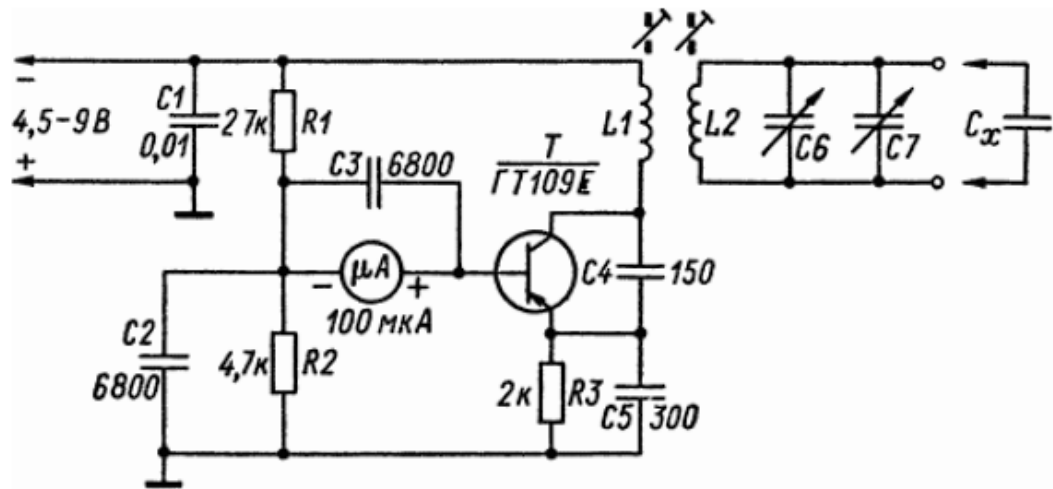


Рис. 2.11 - Схема резонансного вимірювача ємностей, що використовує явище поглинання

На рис. 2.11 наведено схему резонансного вимірювача ємностей, заснованого на використанні явища поглинання (абсорбції). Прилад містить малопотужний генератор за схемою ємнісної триточки, з коливальним контуром якого індуктивно пов'язаний вимірювальний контур L2, C6, C7. Зв'язок між контурами встановлюється порівняно сильною (наприклад, використання загального феритового сердечника для котушок L1 і L2) з метою забезпечення помітного впливу вимірювального контуру на режим генератора. Індикатором резонансу служить мікроамперметр постійного струму mA, включений у ланцюг бази транзистора Т. При налаштуванні вимірювального контуру в резонанс із частотою генератора енергія, що поглинається контуром, виявляється найбільшою. Це викликає різке

зменшення постійної складової струму бази, що вимірюється мікроамперметром  $\text{mA}$ , що забезпечує чітку фіксацію стану резонансу.

Для зменшення похибки вимірювання малих ємностей можна у вимірювальний контур включити два конденсатори змінної ємності ( $C_6$  та  $C_7$  на рис. 2.11) з максимальними ємностями, наприклад, 500 та 50 пФ. Перед вимірюваннями обидва конденсатори встановлюються на максимальну ємність і за допомогою підстроювального сердечника однієї з котушок домагаються резонансного налаштування генератора та вимірювального контуру. Потім, приєднавши до контуру конденсатор  $C_x$ , залежно від передбачуваної ємності останнього одним із конденсаторів  $C_6$  або  $C_7$  відновлюють резонанс. Відлік за шкалами конденсаторів  $C_6$  та  $C_7$  бажано проводити безпосередньо у значеннях ємностей  $C_x$ .

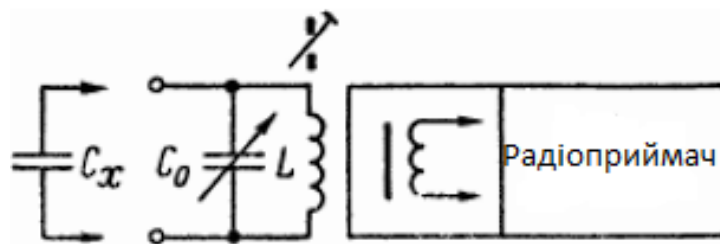


Рис. 2.12 - Схема вимірювання ємностей резонансним методом за допомогою радіоприймача

Розглянутий варіант резонансного методу може бути реалізований за допомогою найпростішої приставки до радіоприймача, що має внутрішню магнітну антену. Приставка (рис. 2.12) являє собою вимірювальний контур  $L, C$ , власна частота якого при максимальному значенні ємності повинна перебувати в межах якого-небудь частотного піддіапазону приймача. Приймач налаштовують на частоту однієї з радіостанцій цього піддіапазону, що добре приймаються, а потім котушку  $L$  розташовують поблизу приймача, паралельно його магнітної антени. При найбільшій ємності  $C$  підстроювальним осердям котушки  $L$  контур налаштовують в резонанс з частотою

налаштування приймача, який виявляється по ослабленню чутності звукових сигналів радіостанції, а потім вимірюють ємність  $C_x$  методом заміщення.

Висока точність фіксації стану резонансу досягається при гетеродинному методі (методі нульових биття). У гетеродинному вимірнику ємностей є два однакові високочастотні гетеродини, коливання яких зміщуються в детекторному каскаді, навантаженому на телефони. При максимальній ємності основних контурних конденсаторів змінної ємності обидва гетеродини підлаштовуються на ту саму частоту, що контролюється за нульовими биттями. Потім паралельно до одного з цих конденсаторів включають конденсатор  $C_x$ , ємність якого визначають методом заміщення.

Якщо обидва гетеродини виконати абсолютно ідентичними, то прилад можна успішно застосувати для вирівнювання ємностей здвоєних та строєних блоків конденсаторів змінної ємності. Для цього до контурів обох гетеродинів одночасно підключають по одній секції блоку конденсаторів, що перевіряється, і при їх максимально введений ємності домагаються нульових биття. Якщо обидві секції однакові, то при пов'язаному зменшенні їх ємностей нульові биття повинні зберігатися.

Однозначний зв'язок між ємністю коливального контуру генератора і частотою збуджуваних коливань дозволяє створити вимірник ємностей, що складається з генератора, контур якого включаються конденсатори  $C_x$ , і частотоміра, що має шкалу з безпосереднім відліком значень  $C_x$ .

У всіх варіантах застосування резонансного методу попереднє регулювання вимірної схеми слід виконувати при підключених до неї провідниках зв'язку з об'єктом вимірювань, довжина яких повинна бути меншою.

#### 2.4 Моделювання запропонованого методу

Вибір відповідної математичної моделі для неруйнівного контролю конденсаторів є критичним етапом розробки поліпшеного методу. Для цього

пропонується використовувати модель, засновану на рівняннях електродинаміки та принципах електричних кіл.

Розглянемо рівняння, що описує основну електричну властивість конденсатора – зв'язок між зарядом ( $Q$ ) та напругою ( $V$ ). Дане рівняння представлено у формулі:

$$Q = C * U \quad (2.34)$$

де:  $Q$  – заряд на конденсаторі,

$C$  – ємність конденсатора,

$U$  – напруга на конденсаторі.

Це рівняння показує, що заряд на конденсаторі пропорційний його напрузі, коефіцієнт пропорційності - це ємність конденсатора.

Рівняння Максвелла відіграє важливу роль описі електродинамічних процесів всередині конденсатора. Ці рівняння пов'язують електричне та магнітне поля, а також враховують зміни у часі. Вони представлені так:

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon_0}, \quad (2.35)$$

$$\nabla \cdot B = 0, \quad (2.36)$$

$$\nabla \times E = - \frac{\partial B}{\partial t}, \quad (2.37)$$

$$\nabla \times B = \mu_0 J + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \quad (2.38)$$

де:  $E$  – вектор електричного поля;

$\nabla$  - оператор Гамільтона;

$B$  – вектор магнітного поля;

$\rho$  – об'ємна щільність заряду;

$J$  - густина струму;

$\epsilon_0$  - діелектрична проникність вакууму,

$\mu_0$  - магнітна стала.

Для розширення моделі та дослідження впливу температури на ємність конденсатора додамо відповідне рівняння. Таке рівняння може бути представлено як залежність ємності від температури. Припустимо, що зміна ємності ( $\Delta C$ ) може бути виражена в наступній формі:

$$\Delta C = C_0 \cdot \beta \cdot \Delta T \quad (2.40)$$

де:  $C_0$  - початкова ємність конденсатора за певної температури,  $\beta$  - температурний коефіцієнт зміни ємності,  $\Delta T$  - зміна температури.

Ці рівняння разом описують вплив температури на ємність конденсатора, а рівняння Максвелла враховують основні електродинамічні взаємодії всередині конденсатора.

Для більш глибокого розуміння електродинамічних процесів у конденсаторах було розроблено та реалізовано модель руху електронів. Моделювання виконане в програмному забезпеченні COMSOL Multiphysics, яке дозволяє враховувати взаємодію електронів із електромагнітними полями всередині конденсатора.

У моделі було враховано такі фізичні параметри:

- Заряд електрона: значення заряду електрона взято стандартне і дорівнює  $1.602 \cdot 10^{-19}$  Кл.
- Маса електрона –  $9.109 \cdot 10^{-31}$  кг.
- Електромагнітні поля: Облік електромагнітних полів здійснювався з допомогою рівнянь Максвелла.

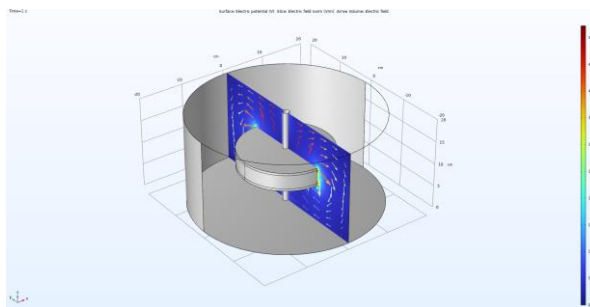


Рисунок 2.1 – 3Д графік руху електронів при дії магнітних полів

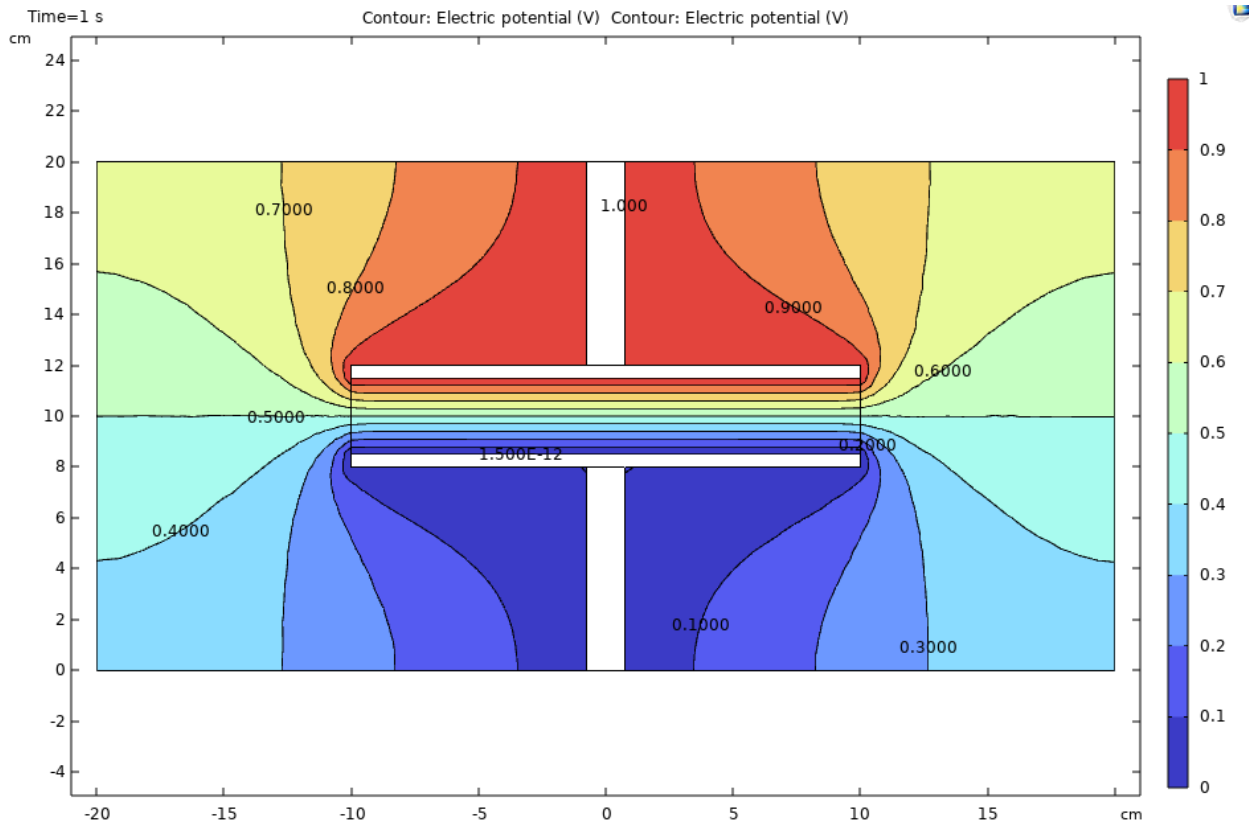


Рисунок 2.2 – 2Д графік руху електронів при дії магнітних полів

У ході проведеного дослідження було виконано моделювання руху електронів у плоскому конденсаторі, підданому впливу магнітного поля. Конфігурація конденсатора включала дві паралельні плоскі пластини, розташовані на відстані одна від одної.

Математична модель, що використовується в дослідженні, включала систему рівнянь, що описують рух електронів під впливом електричного та магнітного полів. Під впливом магнітного поля виникала сила Лоренца, перпендикулярна до швидкості електронів і спрямована згідно з правилом лівої руки, що призводило до вигину траєкторій електронів.

Аналіз результатів дозволив виявити зміни траєкторій електронів під впливом магнітного поля. Траєкторії виявлялися вигнутими, і параметри магнітного поля впливали на форму та амплітуду руху електронів. Досліджувався вплив різних параметрів, таких як сила магнітного поля, відстань між пластинами та початкові умови, на рух електронів.

**Висновки:** Дослідження параметрів конденсаторів дозволяє визначити їх характеристики, ємність, опір, та інші параметри, що визначають їхню ефективність.

Важливим аспектом розділу є побудова моделі руху електронів в конденсаторі, що дозволяє глибше розуміти динаміку електричного поля та заряду внутрішньо конденсатора. Модель руху електронів допомагає передбачити та оптимізувати характеристики конденсатора, враховуючи різноманітні фактори, такі як напруга, температура, та матеріали конструкції.

### 3 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКРАЩЕНОГО МЕТОДУ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

#### 3.1 Опис Експериментальної установаки

Експериментальна установаки базується на приладі для вимірювання основних параметрів конденсатора, який було спроектовано до бакалаврської дипломної роботи. На рисунку 3.1 представлено структурну схему приладу.

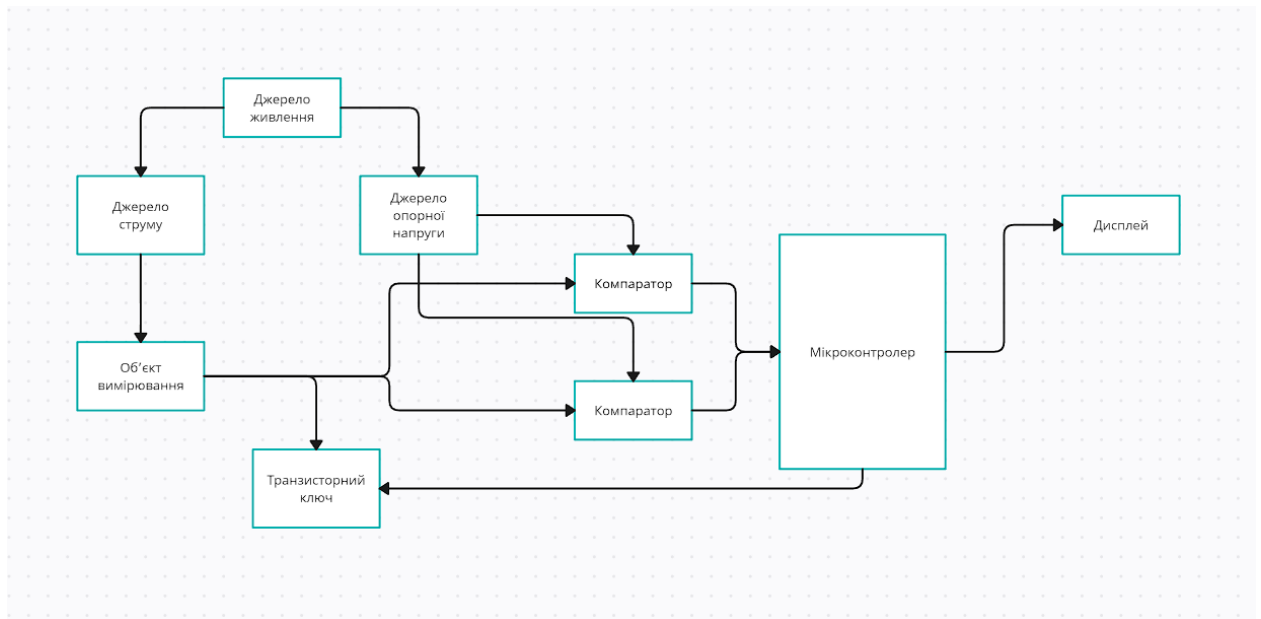


Рисунок 3.1 – Структурна схема пристрою вимірювання параметрів конденсаторів

Розроблено функціональну електричну схему приладу для вимірювання параметрів конденсатора згідно структурної схеми на рис. 3.1. Це показано на рисунку 3.2.

Оскільки функцією пристрою є виконання математичних обчислень, вимірювання часових інтервалів, подача керуючих сигналів на транзисторні ключі та виведення даних на дисплеї, пристрій було спроектовано на основі мікроконтролера.



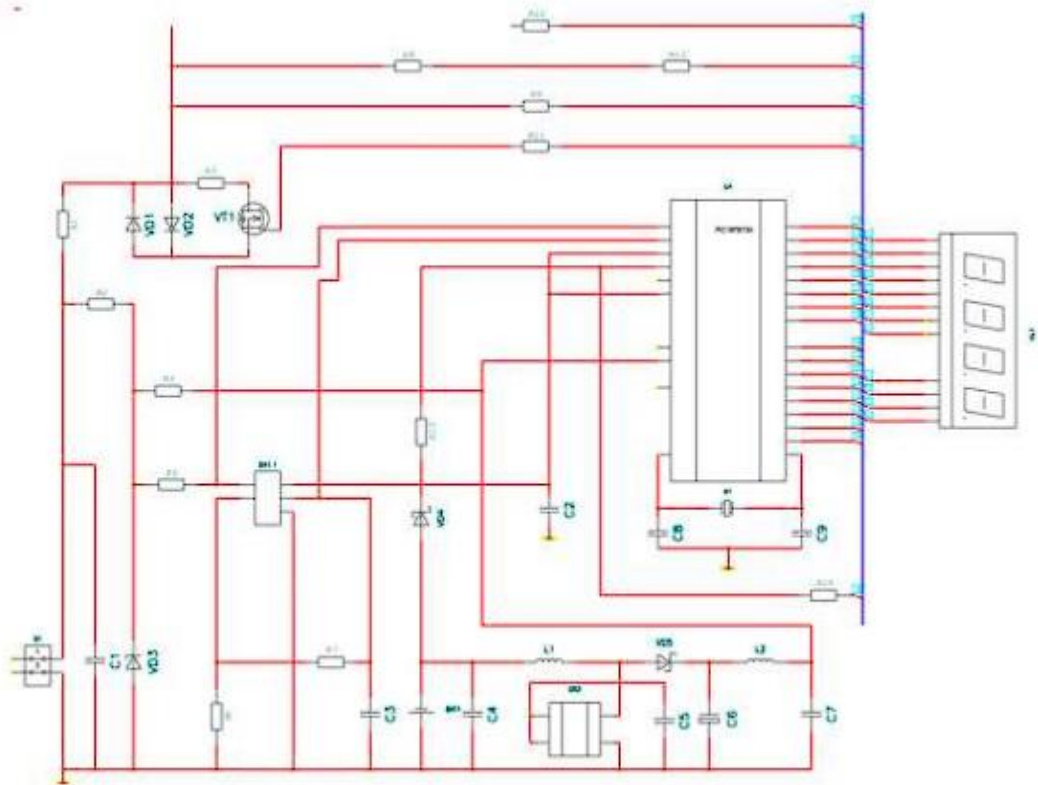


Рисунок 3.2 – Схема електрична принципова ESR вимірювача

Мікроконтролер PIC16F873A живиться від напруги 3.3 В з перетворювача, що підвищує напругу, на мікросхемі DA2 типу NCP1402SN33 і елементах VD5, L1, C4-C6. Дана мікросхема характеризується високим ККД та малим власним струмом споживання. Живлення мікроконтролера додатково фільтрується від високочастотних перешкод фільтром L2C7.

Індикація здійснюється за допомогою рідкокристалічного індикатора, сегментні виводи якого підключені до порта мікроконтролера, а виводи розрядів до виводів мікроконтролера RC4-RC7. Застосована посементна динамічна індикація – у кожен момент часу опитується лише один сегмент. Такий спосіб динамічної індикації дозволив відмовитися як від розрядних ключів, так і від резисторів, що гасять, в ланцюгах сегментів.

В даному приладі застосовується спосіб вимірювання ESR та ємності шляхом заряду конденсатора стабільним струмом. Для спрощення схеми як джерело струму використовується простий резистор. Напруга на конденсаторі в процесі зарядки не перевищує 0.1, тоді як струм визначається напругою

живлення мікроконтролера, тому струм зарядки змінюється незначно, а похибка, викликана цією зміною, коригується програмно.

Система захисту від підключення зарядженого конденсатора складається з елементів R1, VD1, VD2, R2, VD3, R5. Ланцюг з п'ятиватного резистора R1 і потужних діодів VD1, VD2 захищає транзистор VT1 і порти RC0, RC1, RC3 мікроконтролера, а також швидко поглинає енергію заряду, розвантажуючи інші елементи захисту. Ланцюг R2, VD3, R5 захищає вхід мікроконтролера AN0 і неінвертуючий вхід операційного підсилювача DA1.1, що використовується для посилення дуже низьких напруг з вимірюваного конденсатора. Система захисту приладу дозволяє захистити прилад від підключення практично будь-якого зарядженого конденсатора.

У приладі застосований швидкодіючий rail-to-rail ОП MCP6022 з малим струмом споживання – не більше 1.5 мА. Ланцюг R2, R4 створює позитивний зсув на операційному підсилювачі для компенсації напруги початкового зміщення. Крім того, слабкий струм через R4 створює необхідний потенціал на вході приладу в режимі очікування. Конденсатор C1 покращує стабільність у режимі очікування.

Транзистор VT1 і резистор R3 крім розряду конденсатора також використовуються при калібруванні приладу. У цьому режимі при відкритому транзисторі через резистор R3 протікає вимірювальний струм 10 мА (через R9 і порт RC0 МК) і прилад, вимірявши його опір як еталонне, встановлює 42 відповідно до нього коригувальний коефіцієнт. Програмно вноситься поправка на «випадаючий» з ланцюга R1 і ненульовий опір відкритого каналу VT1, який приймається рівним 40 мОм. При цьому калібрування з точністю  $\pm 2\%$  забезпечується для значень цього параметра використовуваного транзистора в межах 0 – 80 мОм. Вибір такого транзистора не викликає труднощів. Резистор R3 бажано брати з допуском трохи більше  $\pm 0.5\%$ , у крайньому разі –  $\pm 1\%$

### 3.2 Проведення експериментів з використанням покращеного методу

Зарядимо розряджений конденсатор ємністю  $C$  шляхом переведення перемикача  $S1$  в положення ВКЛ (рис. 3.3) до деякої напруги  $U_{c0}$ .

$$U_c = U_{c0} \quad (3.1)$$

Зокрема, при нескінченно великому часі заряджання буде  $U_{c0} = \varepsilon$ . Якщо потім перемикач  $S1$  миттєво перевести в положення ВІКЛ відбудуватиметься розрядка конденсатора через опір  $R$ .

Введемо такі позначення:

$U_c$  – миттєве значення напруги на конденсаторі;

$U_{c0}$  - напруга на конденсаторі при  $t=0$ ;

$U_R$  - миттєве значення напруги на опорі;

$I$  - миттєве значення струму в ланцюзі;

$q$  - заряд на обкладинці конденсатора;

$t$  – час;

$$U_r = Ri = R \frac{dq}{dt} \quad (3.2)$$

$$U_c = \frac{1}{C} q \quad (3.3)$$

За другим законом Кірхгофа: в будь-якому контурі сума алгебри ЕРС дорівнює алгебраїчній сумі напруг на опорах, що входять в цей контур. Тому можна записати:

$$U_r + U_c = 0 \quad (3.4)$$

З рівнянь отримаємо:

$$R \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C} q = 0 \quad (3.5)$$

Перетворимо це рівняння до такого виду:

$$\frac{dq}{dt} + \frac{1}{RC}q = 0 \quad (3.6)$$

Рівняння (4) є лінійне однорідне диференціальне рівняння 1-го порядку. Його просто проінтегрувати, розділивши змінні, тобто записавши у вигляді:

$$\frac{dq}{q} = -\frac{dt}{RC} \quad (3.7)$$

звідси випливає:

$$\int \frac{dq}{q} = \int -\frac{dt}{RC} \quad (3.8)$$

Взявши інтеграли, отримаємо:

$$\ln q = -\frac{t}{RC} + \ln \text{const} \quad (3.9)$$

(Маючи на увазі подальші перетворення, ми постійну інтеграцію написали у вигляді  $\ln \text{const}$ ).

Потенціювання цього співвідношення дає:

$$\frac{q}{\text{const}} = e^{-\frac{t}{RC}} \quad (3.10)$$

Звідси випливає:

$$q = \text{const} * e^{-\frac{t}{RC}} \quad (3.11)$$

Вираз (3.5) є загальним рішенням рівняння (3.4). Значення  $\text{const}$  знайдемо з початкових умов. При  $t=0$  з (1) та (2) отримаємо:

$$q = Uc0C \quad (3.12)$$

Підстановка отриманого виразу рівняння (5) дає:

$$Uc0C = const - e^{-\frac{0}{RC}} = const \quad (3.13)$$

Розділивши ліву та праву частини цього рівняння на 3 з урахуванням (3.2) можна записати:

$$Uc = Uc0 - e^{-\frac{t}{RC}} \quad (3.14)$$

З формули (3.6) слідує, що при короткому замиканні RC – ланцюга напруга на конденсаторі зменшується за експоненційним законом від  $U_{C0}$  при  $t=0$  до 0 при  $t=\infty$ . Теоретично  $U_C$  буде завжди більше нуля, тому що  $t$  завжди кінцева величина.

При повній розрядці конденсатора (при нульовому показанні вольтметра, що вимірює напругу на конденсаторі) миттєво переключимо перемикач S1 положення ВКЛ (див. рис. 3.3).

За другим законом Кірхгофа можна записати:

$$Ur + Uc = \varepsilon \quad (3.15)$$

З формули (3.7) отримаємо:

$$R \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C} q = \varepsilon \quad (3.16)$$

Перетворимо це рівняння до такого виду:

$$\frac{dq}{dt} + \frac{q}{RC} = \frac{\varepsilon}{R} \quad (3.17)$$

Рівняння (8) є лінійне неоднорідне диференціальне рівняння 1-го порядку. Як відомо з теорії диференціальних рівнянь, загальне рішення лінійного неоднорідного диференціального рівняння можна отримати, додавши будь-яке його окреме рішення до загального рішення відповідного однорідного рівняння.

Рівняння (5) дає загальне рішення однорідного рівняння. Приватне рішення отримаємо з умови, що конденсатор заряджається до напруги  $U_C = \varepsilon$  при нескінченно великому часі зарядки. Тому:

$$q = \varepsilon * C \quad (3.18)$$

Склавши рівняння, отримаємо:

$$q = \varepsilon * C + const - e^{-\frac{t}{RC}} \quad (3.19)$$

Знайдемо const із початкової умови при  $t=0$ ,  $U_C=0$ ,  $q=0$ .

$$0 = \varepsilon * C - const - e^{-\frac{0}{RC}} \quad (3.20)$$

З урахуванням рівняння знаходимо:

$$q = \varepsilon * C - \varepsilon * C * e^{-\frac{t}{RC}} \quad (3.21)$$

Розділивши дані рівняння на  $C$ , отримаємо:

$$U_C = \varepsilon(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (3.22)$$

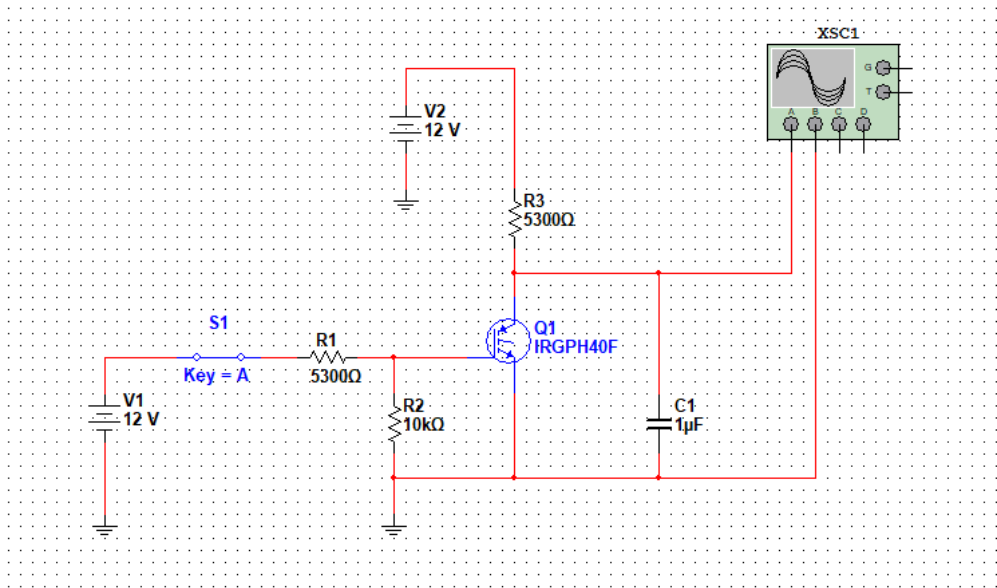


Рисунок 3.3 – Схема моделювання заряду та розряду конденсатора

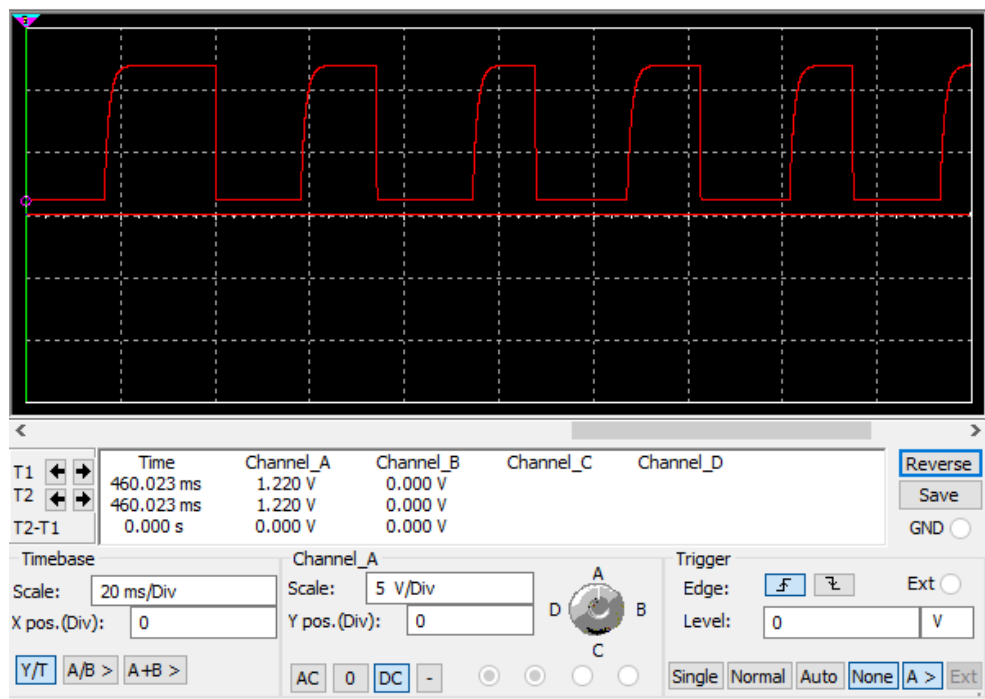


Рисунок 3.4 – Моделювання окремої частини схеми з опором 1кОм

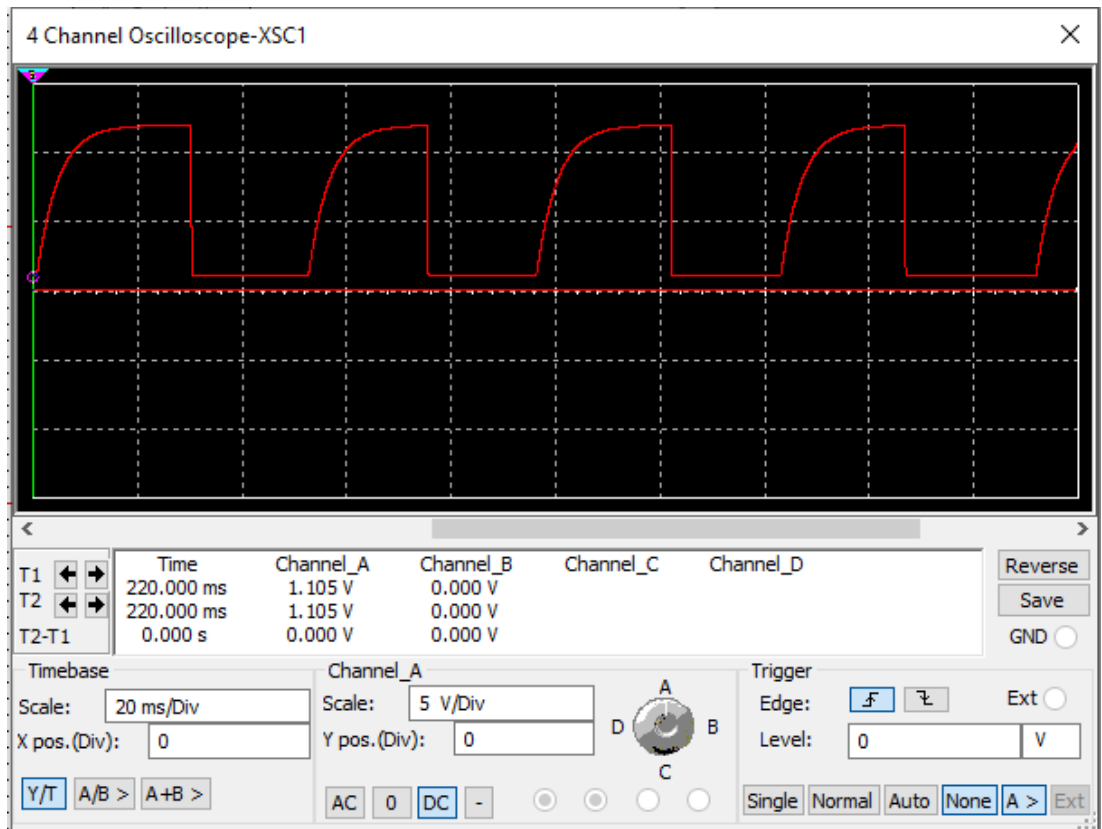


Рисунок 3.5 - Моделювання окремої частини схеми з опором 4кОм

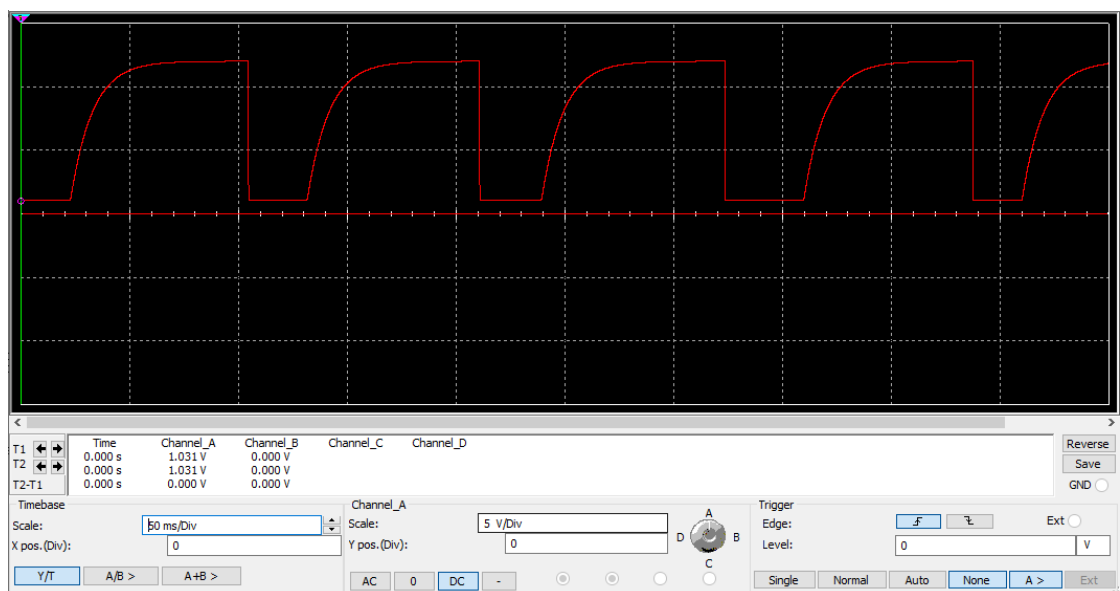


Рисунок 3.6 - Моделювання окремої частини схеми з опором 10кОм

В ідеальних умовах, коли у нас нескінченно потужне джерело напруги з нульовим внутрішнім опором, ідеальні надпровідні дроти та абсолютно бездоганний конденсатор – цей процес відбуватиметься миттєво.



Але завжди існує опір, наприклад резистор, або опір дротів, чи внутрішній опір джерела напруги. У цьому випадку швидкість заряду конденсатора буде залежати від опору у ланцюгу та ємності конденсатора, а сам заряд йтиме по експонентному закону. Чим менше опір та ємність, тим швидше відбудеться заряд конденсатора. Якщо опір дорівнює 0, то і час заряду дорівнює 0.

**Висновки.** В даному розділі було побудовано структурну схему вимірювача ємності та ESR, схему електричну принципіальну, проведено моделювання процесу заряду та розряду конденсатора.

## 4 РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ НА ПРОВАДЖЕННЯ ВИМІРЮВАЧА ESR

В даному розділі було проведено аналіз впровадження вимірювача ESR та ємності конденсатора. Основна ідея проекту полягає у використанні неруйнівних методів контролю для діагностики конденсаторів.

Змістом ідеї є створення приладу для діагностики конденсаторів. Основними напрямками застосування є:

1. Домашня діагностика – використання можливе для діагностики приладів в домашніх умовах.
2. Майстерні з ремонту та обслуговування електроніки – використання можливе в сервісних центрах з метою діагностики та ремонту приладів.
3. Освітні заклади - можливе використання в закладах освіти для реалізації практичних навичок з діагностики приладів.

Одним із важливих етапів створення та запуску стартапу є розгляд потенційних техніко-економічних переваг у порівнянні з пропозиціями конкурентів. Цей аналіз допоможе зрозуміти, чим продукт відрізняється від інших на ринку та які переваги він може принести як користувачам, так і вашій компанії. Ось кілька основних елементів, які слід врахувати:

- Компактність та портативність.
- Функціональні властивості.
- Цінова конкурентоспроможність.
- Легкість впровадження та користування.
- Низькі витрати на обслуговування.

Таблиця 4.1 містить перелік слабких, сильних і нейтральних характеристик і властивостей ідеї потенційної пропозиції, які використовуються для формування спроможності конкурента.

Таблиця 4.1 – Визначення характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	Потенційні товари/концепції конкурентів		W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Запропонований метод	Загальноживаний метод			
1.	Компактність та портативність	Дає змогу	Не дає змогу	–	Має приблизно такий же розмір, як і портативні аналоги	Менший порівняно з стаціонарними приладами, працює від ААА батарейки
2.	Функціональні властивості	Дає змогу	Не дає змогу	–	–	Має захист від відключення до заряджених конденсаторів
3.	Цінова конкурентоспроможність	Дає змогу	Не дає змогу	–	–	Вартість приладу менша порівняно з конкурентами
4.	Легкість впровадження та користування	Дає змогу	Не дає змогу	–	Принцип користування схожий на інші прилади	Можно використовувати без попереднього калібрування
5.	Низькі витрати на обслуговування	Дає змогу	Не дає змогу	–	-	Прилад не потребує постійного тех.огляду на наявність несправностей

#### 4.1 Технологічний аудит ідеї проекту

Було проведено аудит технологій, щоб визначити, як втілити ідею проекту. Визначення технологічної здійсненності концепції проекту включає аналіз таких елементів (табл. 4.2):

- технологія монтажу компонентів (through hole or smt);
- доступність монтажу без додаткових витрат на обладнання;
- впровадження нових технологій, використання існуючих.

Таблиця 4.2 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Компактність та портативність	2-шаровий друкований вузол з through hole монтажем	+	+
2	Функціональні властивості	Має захист від підключення заряджених конденсаторів	+	+
3	Цінова конкурентоспроможність	Наявність всіх компонентів у вільному доступі	+	+
4	Низькі витрати на обслуговування	Можливість збірки в домашніх умовах	+	+

На підставі аналізу характеристик проекту можна зробити висновок щодо технологічної реалізації. Проект, який передбачає компактність, високі функціональні властивості, цінову конкурентоспроможність та низькі витрати на обслуговування, вигідно реалізувати з використанням сучасних технологій.

Щодо компактності, слід розглядати інноваційні рішення, спрямовані на зменшення розмірів без втрати функціональності. Забезпечення функціональності може бути досягнуте через інтеграцію передових технологій та модульну архітектуру.

Цінова конкурентоспроможність може бути забезпечена використанням технологій, що знижують виробничі витрати та загальну вартість продукту, не пожертвуючи якістю. Ефективні рішення для оптимізації процесів виробництва можуть сприяти досягненню цього результату.

Низькі витрати на обслуговування можна забезпечити використанням технологій, які передбачають моніторинг, віддалене управління та використання датчиків для попередження поломок. Такий підхід дозволяє знизити необхідність у регулярних технічних обслуговуваннях.

#### 4.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Визначення ринкових можливостей, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проекту, дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів.

Спочатку проводиться аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку (табл. 4.3).

Таблиця 4.3 – Попередня характеристика потенційного ринку

№	Показники стану ринку	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	3

## Продовження таблиці 4.3

2	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
3	Наявність обмежень для входу	Висока конкуренція
4	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	ISO, ДСТУ
5	Середня норма рентабельності в галузі, %	85%

Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку) порівнюється із банківським відсотком на вкладення. За умови, що останній є вищим, можливо, має сенс вкласти кошти в інший проект.

Надалі визначаються потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та формується орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи (табл. 4.4).

Таблиця 4.4 – Характеристика потенційних клієнтів проекту

№	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Діагностика конденсаторів	Домашнє використання	Більш аматорське використання приладу	Простота використання, безвідмовність
2	Діагностика конденсаторів	Використання в майстернях, сервісах	Більш професійний підхід до використання	Безвідмовність, час роботи, точність вимірювання
3	Діагностика конденсаторів	Використання в навчальних закладах	Використання в навчальних цілях	Захист від зарядженого конденсатора

Після визначення потенційних груп клієнтів проводиться аналіз ринкового середовища: складаються таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають

(табл. № 4.5-4.6). Фактори в таблиці подаються в порядку зменшення значущості.

Таблиця 4.5 – Фактори загроз

№	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Збільшення конкуренції	Буде можливо, що на ринку з'явиться багато конкурентів і буде важко виділитися.	Вигадувати унікальні функції та потужний маркетинг
2	Виявлення нових технологій як наслідок наукових досягнень	Поява нових методів, покращення або зміна старих	Додавання нових технологій до виробничого процесу
3	Нестабільність ринку України	Війна, інфляція, низький рівень економіки,	Вихід на міжнародний ринок

Таблиця 4.6 – Фактори можливостей

№	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Інвестиції	Зацікавленість інших у цьому стартапі	Виконання всіх вимог інвестора
2	Постійна модернізація	Покращення приладу, введення нових ревізій	Постійне оновлення приладу

Основні фактори загроз і можливостей були визначені для проекту. Більшість загроз пов'язані з появою нових або розвитком старих технологій, що призводить до появи нових конкурентів і вимагає від проекту змін. Тим не менш, було виявлено, що загрози не є надзвичайно серйозними, а ймовірність того, що вони виникнуть, є досить низькою.

Надалі проводиться аналіз пропозиції: визначаються загальні риси конкуренції на ринку (табл. 4.7).

Таблиця 4.7 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства
Тип конкуренції - чиста	У цьому контексті підприємства змушені постійно підвищувати якість своїх товарів, знижувати ціни та шукати інноваційні рішення для здобуття та збереження клієнтів.	Відсутність обмежень для входження нових учасників на ринок, продукти чи послуги подібних компаній є замінювальними
За рівнем конкурентної боротьби – національний	Ринок охоплює всю країну	Охопити весь ринок України
За галузевою ознакою – внутрішньогалузева	Галузь діагностики конденсаторів	Фактори, що впливають на успіх
Конкуренція за видами товарів – товарно-видова	Конкуренція з іншими виробниками вимірювача	Продукт на ринку веде конкурентну боротьбу як з товарами-субститутами, так і з іншими марками
За характером конкурентних переваг – цінова	Для значної частки споживачів ціна є визначальним фактором	Головною конкурентною перевагою є унікальність позиціонування
За інтенсивністю – не марочна	Виріб тільки виходить на ринок	Стати успішним брендом

Після аналізу конкуренції проводиться більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі (за моделлю 5 сил М. Портера) (табл. 4.8).

Таблиця 4.8 – Аналіз конкуренції в газулі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товаро-замінники



## Продовження таблиці 4.8.

	ESR-micro v4.3S, Digital DMM6013, Mastech MS8910	Будь-яка компанія з виробництва вимірювальних приладів	Постачальники компонентів, завод з виготовлення ДП	Сервісні центри, навчальні заклади	Конкуренти
Висновки	Середня конкурентність	Можливий вхід на ринок, потенційних конкурентів не багато	Існує залежність від постачальників компонентів та заводів з виробництва ДП	Клієнти диктують умови, потреби від приладу	Обмежень не існує

Проект є конкурентноспроможним, враховуючи аналоги. Силіними сторонами є: портативність, ціна, захист.

На основі аналізу конкуренції, проведеного в табл. 4.8), а також із урахуванням характеристик ідеї проекту (табл. 4.1), вимог споживачів до товару (табл. 4.4) та факторів маркетингового середовища (табл. №№ 4.5-4.6) визначається та обґрунтовується перелік факторів конкурентоспроможності.

Таблиця 4.9 – Обґрунтування факторів конкурентноспроможності

№	Фактор конкурентноспроможності	Обґрунтування
1	Портативність	Розмір приладу менший порівняно з аналогами, за рахунок використання батарейки типу ААА
2	Час роботи	Прилад має режим сна, що сказується на довготривалості приладі в позитивну сторону
3	Захист	Має захист від підключення заряджених конденсаторів
4	Дешевизна	Сбірка приладу дешевше порівняно з аналогами

За визначеними факторами конкурентоспроможності (табл. 4.9) проводиться аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту (табл. 4.10).

Таблиця 4.10 – Таблиця аналізу сильних та слабких сторін

Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів порівняно з проектом						
		-3	-2	-1	0	1	2	3
Можливість удосконалення	6				+			
Ергономіка	10						+	
Ступінь безпеки	10							+
Складність використання	5				+			

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) (табл. 4.11) на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін (табл. 4.10).

Перелік ринкових загроз та ринкових можливостей складається на основі аналізу факторів загроз та факторів можливостей маркетингового середовища. Ринкові загрози та ринкові можливості є наслідками (прогнозованими результатами) впливу факторів, і, на відміну від них, ще не є реалізованими на ринку та мають певну ймовірність здійснення. Наприклад: зниження доходів потенційних споживачів – фактор загрози, на основі якого можна зробити прогноз щодо посилення значущості цінового фактору при виборі товару та відповідно, – цінової конкуренції (а це вже – ринкова загроза).

Таблиця 4.11 – SWOT-аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: працює від батарейки, компактний, має захист від підключення зарядженого конденсатора.	Слабкі сторони: залежність від постачальників, відсутність команди.
Можливості: поява інвесторів, витіснення конкурентів, розвиток в даній галузі	Загрози: війна в країні, нестабільність економіки

На основі SWOT-аналізу розробляються альтернативи ринкової поведінки (перелік заходів) для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок (див. табл. 4.8, аналіз потенційних конкурентів). Визначені альтернативи аналізуються з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів (табл. 4.12).

Таблиця 4.12 – Альтернативи ринкового впровадження проекту

№	Альтернатива ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Інвестиції інвесторів	80%	1,5 р.
2	Кредит	100%	1 р.
3	Власні накопичення	99%	3 р.

Найкращою альтернативою є власні накопичення. Так як інвестори можуть бути не зацікавлені в даному проекті, а якщо брати кредит, то є ймовірність, що проект може не реалізуватися, і не буде грошей для виплати кредиту.

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (табл. 4.13).

Таблиця 4.13- Вибір цільових груп потенційних споживачів

№	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Майстерні	+	100%	90%	40%
2	Домашнє застосування	+	70%	90%	15%

Продовження таблиці 4.13.

3	Навчальні заклади	+	80%	30%	10%
Які цільові групи обрано: обираю всі групи					

Серед цільових груп були розглянуті майстерні, домашнє застосування, навчальні заклади. Мною обрано всі групи і буде використовуватися стратегія масового маркетингу.

Для роботи в обраних сегментах ринку необхідно сформувати базову стратегію розвитку (табл. 4.14).

Таблиця 4.14 – Визначення базової стратегії розвитку

№	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1	Покриття всього ринку	Масовий маркетинг	Високий рівень продукту	Стратегія високої якості

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (табл. 4.15).

Таблиця 4.15 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачі?	Чи буде компанія копіювати основні хар-ки товару конкурента і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1	Ні	Заміна конкурентів на ринку	Мультизадачність	Стратегія лідера

На основі вимог споживачів з обраних сегментів до постачальника (стартап-компанії) та до продукту (див. табл. 4.4), а також в залежності від

обраної базової стратегії розвитку (табл. 4.14) та стратегії конкурентної поведінки (табл. 4.15) розробляється стратегія позиціонування (табл. 4.16), що полягає у формуванні ринкової позиції (комплексу асоціацій), за яким споживачі мають ідентифікувати торгівельну марку/проект.

Таблиця 4.16 - Визначення стратегії позиціонування

№	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного проекту	Вибір асоціацій
1	Якість, надійність, зручність використання, заміна щупів, захист компонентів	Стратегія високої якості	Висока якість, ергономіка, взаємозамінність комплектуючих	Висока якість, ергономіка, взаємозамінність комплектуючих

#### 4.3 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Першим кроком є формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач. Для цього у табл. 4.17 потрібно підсумувати результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 4.17 – Визначення ключових переваг концепції

№	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами
1	Якість, надійність, зручність використання, заміна щупів, захист компонентів	Сучасний, якісний прилад, ергономічний	Захист від підключення заряджених конденсаторів,

Надалі розробляється трирівнева маркетингова модель товару: уточнюється ідея продукту та/або послуги, його фізичні складові, особливості процесу його надання (табл. 4.18).

Таблиця 4.18 – Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
1.Товар за задумом	Вимірювач ємності та ESR		
2.Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх/Тл/Е/Ор
	Ергономічність, економічність, портативність, захист від напруги, вимірювання різних ємностей	+	+
3.Товар із підкріпленням	До продажу: гарантія Після продажу: гарантія, підтримка		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: патент			

Наступним кроком є визначення цінових меж, якими необхідно керуватись при встановленні ціни на потенційний товар (остаточне визначення ціни відбувається під час фінансово-економічного аналізу проекту), яке передбачає аналіз ціни на товари-аналоги або товари субститути, а також аналіз рівня доходів цільової групи споживачів (табл. 4.19). Аналіз проводиться експертним методом.

Таблиця 4.19 – Визначення меж встановлення ціни

№	Рівень цін на товарозамінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи	Верхня та нижня межі ціни на товар
1	1300 грн.	700 грн.	Рівень доходів різний	-10%/+35%

Наступним кроком є визначення оптимальної системи збуту, в межах якого приймається рішення (табл. 4.20):

- проводити збут власними силами або залучати сторонніх посередників (власна або залучена система збуту);
- вибір та обґрунтування оптимальної глибини каналу збуту;
- вибір та обґрунтування виду посередників.

Таблиця 4.20 – Формування системи збуту

№	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальники товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Орієнтованість на швидкість та якість діагностики	Швидкість доставки, консультація клієнтів	Сайти з продажу (Olx, Prom)	Власний сайт компанії

**Висновки.** У результаті ретельного аналізу та розробки стартап-проекту на проведення вимірювань еквівалентного серійного опору (ESR), можна зробити висновок щодо ключових аспектів, які визначають перспективи та успішність проекту.

Ринковий аналіз дозволяє визначити потенційні можливості та простори для введення нового продукту в галузі вимірювання ESR. Технічна реалізація враховує важливі аспекти вибору технологій та компонентів, гарантуючи ефективність та точність вимірювань. Спрямовані стратегії маркетингу та реклами враховують особливості цільової аудиторії, забезпечуючи привертання уваги та визнання на ринку.

Фінансові аспекти проекту враховують витрати та стратегії привертання інвестицій, забезпечуючи фінансову стійкість. Інноваційні рішення та конкурентні переваги надають проекту унікальність та забезпечують його вирізнення на ринку.

## ВИСНОВКИ

У ході виконання магістерської роботи було проведено комплексний аналіз та дослідження різноманітних аспектів, пов'язаних із конденсаторами та їх вимірюванням. Аналіз методів неруйнівного контролю надав можливість визначити ефективні стратегії для забезпечення якості та безпеки використання конденсаторів.

Дослідження методів вимірювання параметрів конденсаторів дозволило визначити ключові характеристики, такі як ємність, опір, та інші, важливі для оцінки ефективності конденсаторів. Огляд електrolітичних конденсаторів дав загальну картину їх будови та функціональності, що є критичним для подальшого розуміння їхнього застосування та обмежень.

Побудова моделі руху електронів в конденсаторі сприяла глибшому розумінню фізичних принципів, які лежать в основі їхньої роботи. Структурна та електрична принципова схеми надали важливі інструменти для дизайну та розуміння пристроїв на основі конденсаторів.

У розділі, присвяченому розробці стартап-проекту на проведення вимірювань еквівалентного серійного опору (ESR), були враховані фактори ринкової конкурентоспроможності, технічні особливості та стратегії фінансового забезпечення. Це дозволить не тільки впроваджувати нові технології в сферу вимірювань ESR, але й створити інноваційний продукт, здатний задовольняти потреби та вимоги сучасного ринку.



## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Сусліков Л.М., Студеняк І.П. Неруйнівні методи контролю: Навчальний посібник. – Ужгород: Видавництво УжНУ, 2016. - 192 с. (10.10.2023)
2. Маєвський С.М., Бабак В. П., Щербак Л. М. Основа побудови систем аналізу сигналів у неруйнівному контролі: Навч. посібник для студ. вузів, які навчаються за спец «Фізичні методи та прилади інтроскопії». — К.: Либідь, 1993. — 200 с. (25.10.2023)
3. Білокур І. П. Акустичний контроль: Навчальний посібник. — Київ.:ІЗМН, 1997. — 244 с. (01.11.2023)
4. Білокур І. П. Основи дефектоскопії: Підручник. — К.: «Азимут-Україна», 2004. — 496 с. (15.11.2023)
5. Білокур І. П. Елементи дефектоскопії при вивченні неруйнівного контролю. — К.: НМК ВО, 1990. — 252 с. (15.11.2023)
6. Електричний, магнітний та електромагнітний види контролю: Конспект лекцій. МВ 02070855-80і-01 О. Є. Середюк. — Івано-Франківськ: Факел, 2001. — 170 с. (19.11.2023)
7. Amaral A.M.R., Cardoso A.J.M.: An experimental technique for estimating the ESR and reactance intrinsic values of aluminium electrolytic capacitors. Proc. Instrumentation and Measurement Technology Conf., IMTC 2006, April 2006, pp. 1820–1825. (27.11.2023)
8. Sankaran V.A., Rees F.L., Avant C.S.: Electrolytic capacitor life testing and prediction. Proc. 32nd Annual Meeting IEEE Industry Applications Society, October 1997, vol. 2, pp. 1058–1065 (27.11.2023)
9. Venet P., Perisse F., El-Husseini M.H., Rojat G.: Realization of a smart electrolytic capacitor circuit, IEEE Ind. Appl. Mag., 2002, 8, (1), pp. 16–20 (27.11.2023)
10. Chen Y.-M., Chou M.-W., Wu H.-C.: Electrolytic capacitor failure prediction of LC filter for switching-mode power converters. Proc. 40th Annual

Meeting IEEE Industry Applications Society, October 2005, vol. 2, pp. 1464–1469.  
(28.11.2023)

11. Amaral A.M.R., Cardoso A.J.M.: An ESR meter for high frequencies. Proc. Int. Conf. on Power Electronics and Drives Systems, PEDS, 2005, pp. 1628–1630. (28.11.2023)

12. R. Chen, J.D.V. Wyk, S. Wang, W.G. Odendaal: Improving the characteristics of integrated EMI filters by embedded conductive layers. IEEE Trans. Power Electron., 2005, pp. 611–619. (01.12.2023)

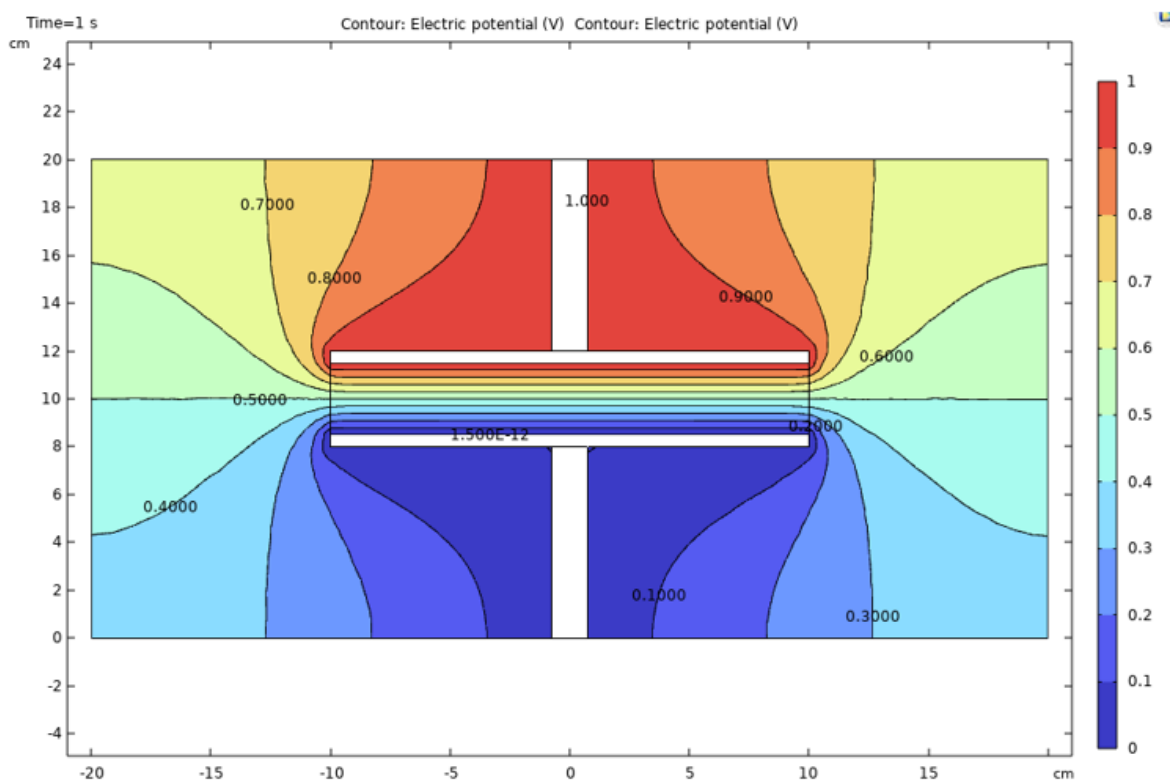
13. Розробка стартап-проектів: практикум: навч. посіб. / О. А. Гавриш, К. О. Бояринова, К. О. Копішинська; КПІ ім. Ігоря Сікорського. –Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 116 с. (14.12.2023)

14. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс] : Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с. (25.12.2023)

15. Вимірювання параметрів конденсаторів [Електронний ресурс]. – 2016 – Режим доступу до ресурсу:[http://zpostbox.ru/izmerenie\\_parametrov\\_kondensatorov.html](http://zpostbox.ru/izmerenie_parametrov_kondensatorov.html). (28.12.2023)

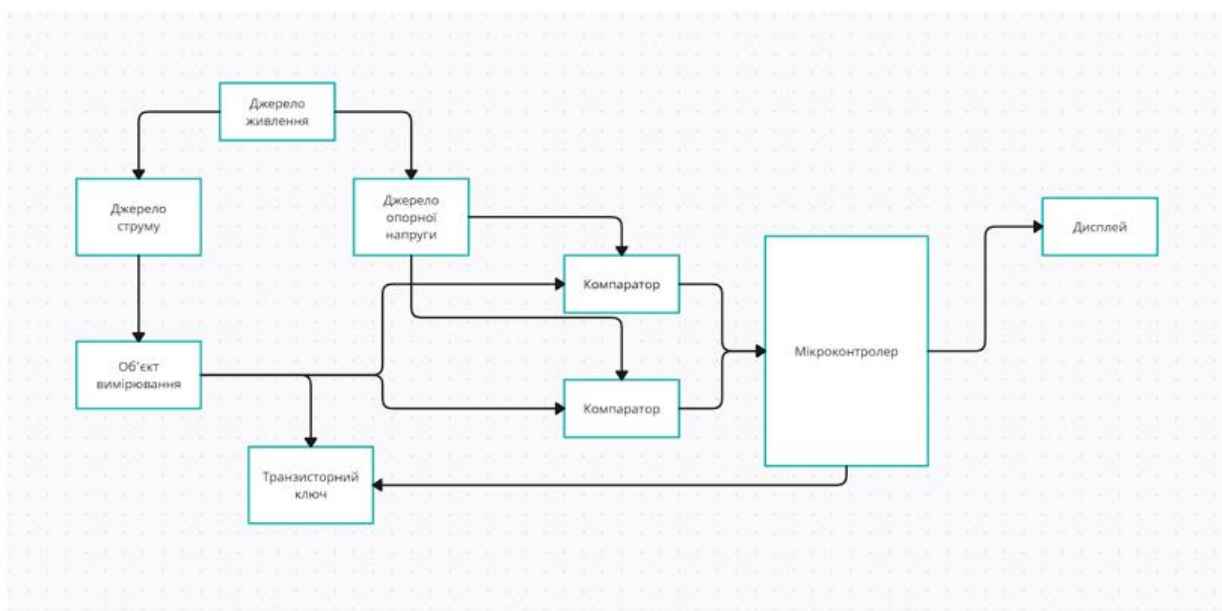
## ДОДАТОК А

## 2Д графік руху електронів при дії магнітних полів в конденсаторі



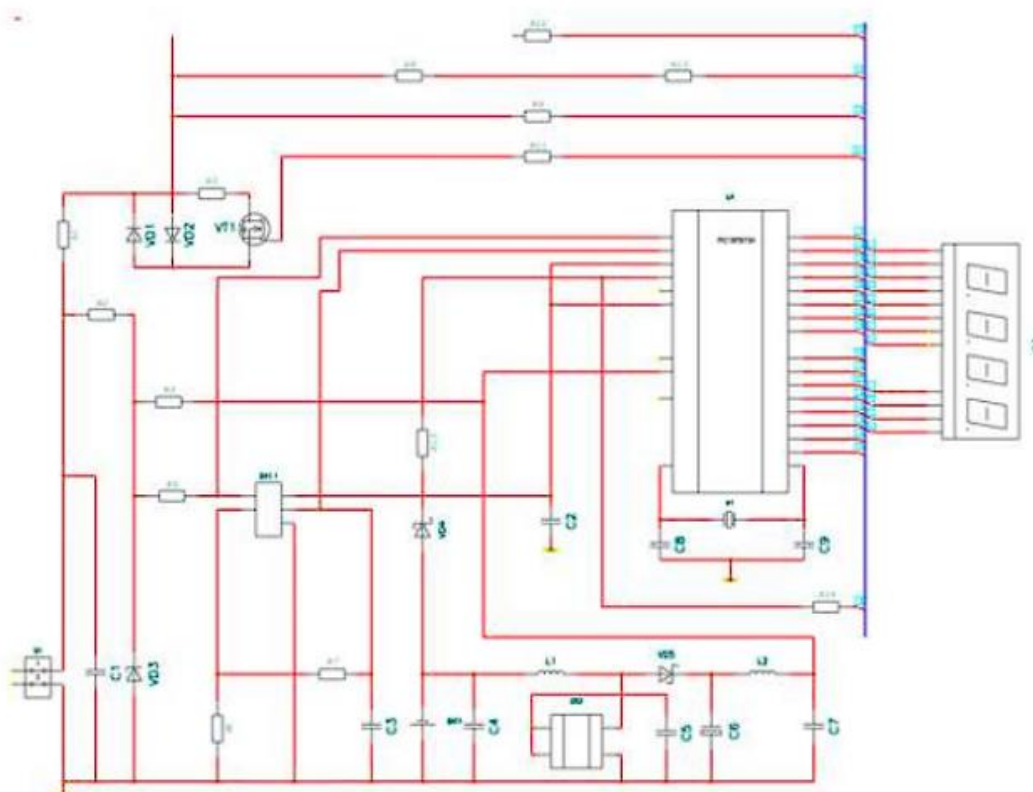
## ДОДАТОК Б

## Структурна схема пристрою вимірювання параметрів конденсаторів



## ДОДАТОК В

Схема електрична принципова пристрою вимірювання параметрів конденсаторів



## ДОДАТОК Г

## Код програми

```

// define pins to segments
#define Gs (1<<RB0)
#define Cs (1<<RB1)
#define Hs (1<<RB2)
#define Ds (1<<RB3)
#define Es (1<<RB4)
#define As (1<<RB5)
#define Fs (1<<RB6)
#define Bs (1<<RB7)

//----- define signes -----
#define _D1 (Bs|Cs)
#define _D2 (As|Bs|Ds|Es|Gs)
#define _D3 (As|Bs|Cs|Ds|Gs)
#define _D4 (Bs|Cs|Fs|Gs)
#define _D5 (As|Cs|Ds|Fs|Gs)
#define _D6 (As|Cs|Ds|Es|Fs|Gs)
#define _D7 (As|Bs|Cs)
#define _D8 (As|Bs|Cs|Ds|Es|Fs|Gs)
#define _D9 (As|Bs|Cs|Ds|Fs|Gs)
#define _D0 (As|Bs|Cs|Ds|Es|Fs)
#define _U (Bs|Cs|Ds|Es|Fs)
#define _u (Cs|Ds|Es)
#define _P (As|Bs|Es|Fs|Gs)
#define _Top As
#define _Bottom Ds
#define _Middle Gs
#define _Space 0
#define _S (As|Cs|Ds|Fs|Gs)
#define _O (As|Bs|Cs|Ds|Es|Fs)
#define _o (Cs|Ds|Es|Gs)
#define _C (As|Ds|Es|Fs)
#define _c (Ds|Es|Gs)

```

```

#define _A (As|Bs|Cs|Es|Fs|Gs)
#define _L (Ds|Es|Fs)
#define _I (Bs|Cs)
#define _F (As|Es|Fs|Gs)
#define _t (Ds|Es|Fs|Gs)
#define _n (Cs|Es|Gs)
#define _E (As|Ds|Es|Fs|Gs)
#define _r (Es|Gs)
#define _H (Bs|Cs|Es|Fs|Gs)
#define _i Cs
#define _b (Cs|Ds|Es|Fs|Gs)
#define _d (Bs|Cs|Ds|Es|Gs)
// define PORTC pins
    //control common pins of indicator
#define portc_sign0_pin RC7
#define portc_sign1_pin RC4
#define portc_sign2_pin RC5
#define portc_sign3_pin RC6
    //mesuring control
#define portc_U1_pin (1<<RC0)
#define portc_U2_pin (1<<RC3)
#define portc_U3_pin (1<<RC1)
    //measuring current on/off
#define U1_on TRISC &= ~portc_U1_pin
#define U2_on TRISC &= ~portc_U2_pin
#define U3_on TRISC &= ~portc_U3_pin
#define U1_off TRISC |= portc_U1_pin
#define U2_off TRISC |= portc_U2_pin
#define U3_off TRISC |= portc_U3_pin
    // mosfet control
#define portc_Mos_pin RC2
    //Mosfet on/off
#define Mos_on Portc_x |= (1<<portc_Mos_pin); PORTC = Portc_x
#define Mos_off Portc_x &= ~(1<<portc_Mos_pin); PORTC = Portc_x
// Define PORTA pins

```

```

// ADC inputs
#define A_direct RA0 //
#define A_OPAMP RA1 //
#define A_ind RA3 // for ind. testing and help for batt. measure
#define A_bat RA3 // for batt. measure
// Uop pins
#define Uop_pins ((1<<RA2)|(1<<RA5))
// Uop_on
#define Uop_on TRISA &= ~Uop_pins
//Uop_off
#define Uop_off TRISA |= Uop_pins
// The work option
#define Time_to_sleep 60 // time to sleep (sec.)
#define Time_to_calibrate 30 // time to calibrate (sec.)
#define Dir_Res_Time_Limit 120 // time to measuring wait at direct res.
// The PORTC station variable
volatile char Portc_x;
// Define signes for common cathode
const unsigned char Gen_[] = {_D0,_D1,_D2,_D3,_D4,_D5,_D6,_D7,_D8,_D9};
// define digits

unsigned char Res_10[8] = {0,0,0,0,0,0,0,0}, Cap_10[8] = {0,0,0,0,0,0,0,0};
// signs to OUT, R, C. Elements 0 - 3 is
// directly going to ind., 4 - 7 is next
unsigned int Res_, Cap_, U_bat;
unsigned short volatile Timer=0xFF, TimeCount=0xFF, TimeSec=0;
char Cali, Res0;//calibration coeff. for U1 (100+-50); the probes own resistance
unsigned short Flags = 0; // Flags bits means:
#define f_anode Flags.F0 //0 - 1-common anode, 0-cathode
#define f_calib Flags.F1 //1 - 1- count the time to calibration
#define f_sleep Flags.F2 //2 - 1- count the time to sleep
#define f_low Flags.F3 //4 - 1- the battery voltage is low
#define f_lowest Flags.F4 //5 - 1- the battery voltage is low
#define f_indbat Flags.F5 //7 - 1 - now indicated battery voltage
//***** Procedure of pause 1 - 127 ms (by 1ms step) *****

```



```

// In parameter - Delay (ms)
// Needs global variable Timer which increments in 0.5 ms interrupts
void pause_ms(unsigned char Delay ) {
    char Delay1;
    Delay1 = Delay;
    //Delay = Delay << 1; // intervals 1 ms (*2)
    Delay += Timer;
    while (Timer != Delay); // wait (Delay) ms or (in-parameter) ms
    asm clrwdt;
    Delay1 += Timer;
    while (Timer != Delay1); // wait (Delay) ms or (in-parameter) ms
    asm clrwdt;
}
//Pause x sec
// In parameter - time for pause (sec)

void pause_s(char Sec){
    char i;
    Sec <<= 2; // *4
    for (i=0; i<Sec; i++) pause_ms(125);
}

//SYNCRONIZATION WITH TMR1 INTERRUPTS //
void int_sync(void){
    PIE1.TMR1IE = 0;
    while (PIR1.TMR1IF==0);
    PIE1.TMR1IE = 1;
    asm clrwdt;
    asm{
        nop;
        nop;
    }
} // we have more than 450us to next interrupt

```

```

//*****      BIN      to      BCD      (0      -      9999)      PROCEDURE
*****
// In parameter - 1. 0 - 9999 int,
//      2. pointer to 4-byte BCD array (symbols to segments)
// writes BCD digits to pointed array
//*****
*****

void int_to_ind(unsigned int In_int, char *In_10) {
    unsigned char s, Sign[4];

    s = (unsigned char)(In_int / 1000); // thousands
    if (s>9) return ;
    Sign[3] = Gen_[s];
    In_int = In_int % 1000;

    s = (unsigned char)(In_int / 100); // hundreds
    Sign[2] = Gen_[s];
    s = (unsigned char)(In_int % 100);
    Sign[1] = Gen_[(unsigned char)(s / 10)]; // decades
    Sign[0] = Gen_[(unsigned char)(s % 10)]; // units

    int_sync();
    In_10 += 4;
    for (s=0; s<=3; s++) { // save to current array
        *(In_10+s) = Sign[s];
    }
}

// ----- Discharging the capacitor at 125 ms -----
void discharge(void) {
    Mos_on; // discharging on
    pause_ms(125);
    Mos_off; // discharging off

}

// current non-linearity correction

```

```

// added to result of ADC coefficient for linearity
unsigned int corr_ADC(unsigned int inADC) {
    char in_4, i;
    const char corr[] = {50, 80, 100, 120, 140, 152, 165, 179, 190, 200, 210, 220, 230, 240,
249, 255};
    in_4 = (char)(inADC >> 2);
    for (i=0; i<=15; i++) {
        if (corr[i] >= in_4) break;
    }
    return inADC + i;
}

// The first test of connected element
// Return: 0 - nothing connected, 1 - capasitor/resistor, 2 - ionistor
// Running time 0.25 - 0.5 s
char in_test(void) {
    char i;
    U1_off;
    U2_off;
    U3_off;
    ADCON1 = 0x80; // RIGHT JAST.; PORTA TO ANALOG
    ADCON0 = (A_direct<<3)| 0b10000001; // Fosc/32, A_direct, ON
    for (i=0; i<=3; i++){ // up to 4 cicles (<=500ms)
        discharge();
        Delay_us(600); // 600us to rise the voltage when not connect
        ADCON0.GO = 1; // start
        while (ADCON0.GO); // wait to conversions end
        if (ADRESL <= 15) return 1; // capasitor or resistor if <=50mV
    }
    Mos_on; // open the mosfet
    pause_ms(1);
    ADCON0.GO = 1; // start
    while (ADCON0.GO); // wait to conversions end
    Mos_off; // switch off mosfet
    if (ADRESL <= 5) return 0; // not connected
    else return 2; // ionistor
}

```

```

}
//Measuring of capacity (prototype)
void C_measure(char Ux, struct Meter *S);
//Measuring of R or ESR prototype
void R_measure(char Ux, struct Meter *S);
char measure(void) {
    struct Meter{unsigned int V1, V2, V3, Vc, Counter;} M ; // V1-V3 - start,
        // first, second voltages (measure ESR); Vc - max voltage of
        // capacitor, Counter - number of 26 us intervals (measuring C);
    unsigned long Cap;
    char flag=0, x;
    ADCON1 = 0x80; // RIGHT JAST.; PORTA TO ANALOG
    ADCON0 = (A_OPAMP<<3)| 0b10000001; // Fosc/32, A_OPAMP, ON
    Delay_us(50);

        // measure by U1
    flag = 2;           // try U1
    x = portc_U1_pin;
    R_measure(portc_U1_pin, &M); //
    if (M.V3 > 800) { // -----ADC too big decrease the current and retry
        flag = 1;           // try U2
        x = portc_U2_pin;
        R_measure(portc_U2_pin, &M); //
        if (M.V3 > 800) { // -----ADC too big decrease the current and retry
            flag = 0;           // try U3
            x = portc_U3_pin;
            R_measure(portc_U3_pin, &M);//

            if (M.V3 > 800) return 0x80; // exit with 'out of range'
        }
    }
}
C_measure(x, &M); // measure the time to charge to 0.1V
M.Vc = corr_ADC(M.vc); //
M.V1 = corr_ADC(M.v1); //
M.V2 = corr_ADC(M.v2); //

```

```

M.V3 = corr_ADC(M.v3); // current non-linearity correction
// ----- R, ESR measuring -----
//  $U_r = 2*U_2 - U_3 - U_1$ 
//  $Res_r = 330*Nadc/(1024*Kop)$ , Kop - OPAMP gain
//  $Kop = 32.23 \Rightarrow Res_r = Nadc$  (x0.01 Ohm)
//  $Res\_ = 2*M.v_2 - M.v_3 - M.v_1$ ;
Res_ = 2*M.v2 - M.v3 - M.v1;
if (Flag == 2) {
    Res_ = (unsigned long)Res_*100/Cali; // correction for calibr.
}
switch (Flag){ // calculate the current coeff. for Res0
    case 0: x = 100; break;
    case 1: x = 10; break;
    default: x = 1; //
}
Res_ -= Res0/x; // Corr. for probes own resis.
if(Res_ > 1024) Res_ = 0; // if  $2*v_2 - v_1 - v_3 < 0 \Rightarrow$  to 0
// ----- C measuring -----
//  $C = (I*T)/U$ ; for Kopamp = 32,23 ==>
//  $C(x0.1\mu F) = 285*Count*X/(V_c - V_1)$ ; X = 1, 10 or 100 for Flag = 0,1 or 2
// (28.5us - real measured pulse width )
switch (Flag){ // calculate the current coeff.
    case 0: x = 1; break;
    case 1: x = 10; break;
    default: x = Cali; // for Flag=2 calibration coeff. insted 100
}
if (M.Vc < (M.V1 + 10 + Res_/20/x)) { // test for resistor (if  $V_c - V_2 < 10$ )
    Flag.F4 = 1;
    return Flag; // return -> resistor
}
Cap = 285 * (unsigned long)M.Counter;
Cap = Cap * x / (M.Vc - M.V1);
if(x==1) Cap = Cap*53/50; // 6% correction for U3 limit
// tests for elements and save to int -----
if (Cap < 100000){

```

```

Flag.F5 = 1; // Capacitor
if (Cap > 9999){
    Flag.F6 = 1; // >999uF
    Cap_ = (unsigned int)(Cap / 10);
}
else Cap_ = (unsigned int)Cap;
}
else {
    Flag.F3 = 1; // ionistor
    Cap_ = (unsigned int)(Cap / 10000);
}
return flag;
}
// Measuring of R or ESR
// changed the v1 - v2 of structure
// in : current type (v1 - v3) , point to structure Meter
void R_measure(char Ux, struct Meter *S) {
    unsigned int V1, V2, V3;
    discharge(); //--> 26us after end of interrups
    Delay_us(50);
    ADCON0.GO = 1; // start
    while (ADCON0.GO); // wait to conversions end
    V1 = (ADRESH << 8) + ADRESL; // save the start voltage
    // start charging by Ux
    TRISC &= ~Ux; // Ux on
    // for interval 26us for waiting same next measuring
    ADCON0.GO = 1; // start
    while (ADCON0.GO); // wait to conversions end
    V2 = (ADRESH << 8) + ADRESL; // save the voltage
    asm nop;
    // measure v2
    ADCON0.GO = 1; // start
    while (ADCON0.GO); // wait to conversions end
    V2 = (ADRESH << 8) + ADRESL; // save the voltage
    asm {

```

```

nop; // add for 26us
nop;
nop;}
    // measure v3
ADCON0.GO = 1;    // start
while (ADCON0.GO); // wait to conversions end
V3 = (ADRESH << 8) + ADRESL; // save the start voltage
asm nop;
TRISC |= Ux; //switch off current (current was switched on within 26*3 =78us)

S->V1 = V1;
S->V2 = V2;
S->V3 = V3; // save to structure
}
//Measuring of capacity
void C_measure(char Ux, struct Meter *S){
    unsigned int Vc0, Vc1, Counter;
    Vc0 = S->V3 - S->V2; //
    if (Vc0 > 1023) Vc0 = 0; // if <0 //
    Vc0 = Vc0 * 2 + S->V1; // Vc0 = v3-vr = 2*(v3-v2)+v1
        // after V3 capacitor already charged within 26us
        // therefor began with Counter=2
        // In next cycle the capacitor charging by 26us pulses until voltage is not
        // out of range or total about to 100ms at maximum (Counter = 4000)
    for (Counter=2; Counter <= 4000; Counter++) {
        if (TMR1L > 230) int_sync(); // if <50us to end interrupt interval then sync.
        ADCON0.GO = 1; // measuring voltage after previous charging
        asm nop;
        TRISC &= ~Ux; // Ux on , charge
        while (ADCON0.GO); //
        Vc1 = (ADRESH << 8) + ADRESL;
        if (Vc1 > 800) break; // Exit if top limit
        TRISC |= Ux; //Ux off , not charge
        Vc0 = Vc1;
        Delay_us(15); // delay for OPamp output stab.
    }
}

```

```

    }          // One step of cycle about 48us
TRISC |= Ux; //Ux off after break
PIE1.TMR1IE = 0; // int. off for stabil pause
Delay_us(30);
ADCON0.GO = 1; // measuring voltage after pause for stabilization U
while (ADCON0.GO); //
Vc1 = (ADRESH << 8) + ADRESL;
PIE1.TMR1IE = 1; // int. on
S->Vc = Vc0;
S->Counter = Counter;
}
//Indication 'out of range'
void w_out(void) {
    Cap_10[7]=_c;
    Cap_10[6]=_Space;
    Cap_10[5]=_Bottom;
    Cap_10[4]=_Bottom;    // 'c _'
    Res_10[7]=_r;
    Res_10[6]= Gen_[9];
    Res_10[5]= Gen_[9];    // _
    Res_10[4]=_Top;    // 'r99 ' - limitless
}
// Indication of charged ionistor
void w_ionistor(void){
    Cap_10[7]=_i;
    Cap_10[6]=_o;
    Cap_10[5]=_n;
    Cap_10[4]=_Bottom;    // 'ion_'

    Res_10[7]=_U;
    Res_10[6]=_Top;
    Res_10[5]=_Middle;    // _
    Res_10[4]=_Bottom;    // 'U -' - DISCHARGE
}

```



```

// Indication of 'calib. error'
void w_error(void) {
    Cap_10[7]=_C;
    Cap_10[6]=_A;
    Cap_10[5]=_L;
    Cap_10[4]=_I;    // 'CALI'

    Res_10[7]=_E;
    Res_10[6]=_r;
    Res_10[5]=_r;
    Res_10[4]=_Bottom;    // 'Err_'
    pause_s(3);
}

//Indication of 'end calib.'
void w_end(void) {
    Cap_10[7]=_C;
    Cap_10[6]=_A;
    Cap_10[5]=_L;
    Cap_10[4]=_I;    // 'CALI'
    Res_10[7]=_E;
    Res_10[6]=_n;
    Res_10[5]=_d;
    Res_10[4]=_Bottom;    // 'End_'
    pause_s(2);
}

// Indication of 'not connect' or batt. voltage
// Indication of 'not connect' but indicate batt. voltage each 16s within 2s
void w_notconnect(){
    static char Flag = 0;
    if(f_indbat==1) {
        if(TimeSec.F1==1) Flag = 2;
        if(Flag==0) { // do next block one time
            Flag = 1;
            int_to_ind(U_bat, &Res_10);
            Res_10[3+4] = _u;

```

```

Res_10[2+4] |= Hs; // +comma = uX.XX
if (f_low==1) {
    Cap_10[3+4] = _b;
    Cap_10[2+4] = _Bottom;
    Cap_10[1+4] = _L;
    Cap_10[0+4] = _o;
}
else {
    Cap_10[3+4] = _b;
    Cap_10[2+4] = _A;
    Cap_10[1+4] = _t;
    Cap_10[0+4] = _t;
}
return;
}
}
else Flag = 0;
    if (Flag == 1) return;
Cap_10[7]=_Space;
Cap_10[6]=_Middle;
Cap_10[5]=_Space;
Cap_10[4]=_Space;    //' - '
Res_10[7]=_Space;
Res_10[6]=_Space;
Res_10[5]=_Middle;
Res_10[4]=_Space;    //' - '
}
// turn off the ind.
void w_space(void) {
    Cap_10[7]=_Space;
    Cap_10[6]=_Space;
    Cap_10[5]=_Space;
    Cap_10[4]=_Space;
    Res_10[7]=_Space;
    Res_10[6]=_Space;
}

```

```

    Res_10[5]=_Space;
    Res_10[4]=_Space;
}
// average OF 10
// in parameter: 0 - simple; 1 - arithmetic rounding
unsigned int average_10(char Round){
    unsigned int x=0;
    char i;
    pause_ms(50);
    for (i=0;i<10;i++){
        pause_ms(25);
        ADCON0.GO = 1;    // start
        while (ADCON0.GO); // wait to conversions end
        x = x + corr_ADC((ADRESH << 8) + ADRESL); // add with linearity
    }
    if ((Round)&&(x % 10 > 4)) Round = 1; // if in parameter not 0
        else Round = 0;    // arithmetic rounding
    return x/10+Round; // average R
}

// Avarige of last 2 measurings
// Procedure is considering current and previuos *Value
// If flag is changed current and next *Value without considering
void avarige_2(char flag, unsigned int *Value){
    static volatile unsigned int Res_A = 0, Cap_A = 0;
    static char flag_1 = 2, flag_2 = 255;
    unsigned int *RC_;
    if (flag == 255) {
        Res_A = 0;
        Cap_A = 0;
        flag_2 = 255;
        return;
    }
}

```

```

if (Value == &Res_) RC_ = &Res_A; //
    else RC_ = &Cap_A;          // prepare needed saved avarige value
if (flag_2 != flag) flag_1 = 2; // flag changed -> next 2 without consider
flag_2 = flag;
if (flag_1 == 0) {              // consider previous if 2-nd
    *Value = (*Value + *RC_) / 2; // after notconnect and further
    }
    else if (flag_1 == 2) flag_1 = 1; // first after notconnect or changed
        else flag_1 = 0;
*RC_ = *Value;
}
// Calibration
char calibration(void) {
    unsigned int x, Vx0;
    char i;
        Cap_10[7]=_C;
        Cap_10[6]=_A;
        Cap_10[5]=_L;
        Cap_10[4]=_I;    // 'CALI'

        Res_10[7]=_C;
        Res_10[6]=_A;
        Res_10[5]=_L;
        Res_10[4]=_I;   // 'CALI'
    pause_s(2);
    ADCON1 = 0x80; // RIGHT JAST.; PORTA TO ANALOG
    ADCON0 = (A_OPAMP<<3)| 0b10000001; // Fosc/32, A_OPAMP, ON
    Delay_us(50);
        Cap_10[7]=_O;
        Cap_10[6]=_P;
        Cap_10[5]=_E;
        Cap_10[4]=_n;    // 'OPEn'
        Res_10[7]=_P;
        Res_10[6]=_r;
        Res_10[5]=_o;

```

```

    Res_10[4]=_b;    // 'Prob'  open the probs
U3_on;
for (i=0; i<100; i++) {
    pause_ms(100);
    ADCON0.GO = 1;    // start
    while (ADCON0.GO); // wait to conversions end
    if (ADRESH == 0x03) break; // exit if probes not conn.
}
U3_off;
if (i==100) return 0; // return if probes connected 10s after message (error)
pause_s(1);
    // Calibration U1 current
Mos_on; //
U1_on; // measure for 2 Ohm
x = average_10(1);
U1_off; //measure start voltage (without current)
if (x>400) return 0; // R>4 - error
Vx0 = average_10(0);
if (Vx0>200) return 0; // Vx0>2 - error
if (x < Vx0) return 0; // or R < Vx0
x -= Vx0; // R = R - V0
Mos_off; //
Cali = (char)(x * 97 / 200); // -3% (R1 and Rds of MOSFET)
EEPROM_Write(1, Cali); // save the current calib.
w_space(); // blank the ind
pause_s(2); // 3 sec. ind. message
    // end U1 calibr. -----
    // Probe res. calibration -----
Cap_10[7]=_C;
Cap_10[6]=_L;
Cap_10[5]=_O;
Cap_10[4]=_S;    // 'CLOS'
Res_10[7]=_P;
Res_10[6]=_r;
Res_10[5]=_o;

```

```

    Res_10[4]=_b;    // 'Prob'   CLOSE probes
for (i=0; i<100; i++) {
    ADCON0.GO = 1;    // start
    while (ADCON0.GO); // wait to conversions end
    if (ADRESH == 0) break; // exit if probes is connect
    pause_ms(100);
}
if (i==100) {
    Res0 = 0;
    EEPROM_Write(2, 0); // save 0 to the probes res.
    return 1; // return if probes not connected >10s after mesage with Res0 = 0
}

pause_s(1);
U1_on; // measure for probes res.
x = average_10(0);
U1_off;
if (x>255) return 0; // R>2.5 - error
Vx0 = average_10(0);
if ((Vx0 > 255)||(x < Vx0)) return 0; // R>255 or V0 > R - error
x -= Vx0; // correction
Res0 = x*100/Cali;
EEPROM_Write(2, Res0); // save the probes res (aver. of 10 measures).
w_space(); // blank the ind/
pause_s(3); // 3 sec. ind. mesage
}

// To SLEEP
void to_sleep(char x) {
    while (1) {
        ADCON0 = 0; // adc off
        PORTB = 0xFF; // IND.OFF BY TURNING TO HI SEGMENTS AND
ANODE/CATH.
        Portc_x
        (1<<portc_sign0_pin)|(1<<portc_sign1_pin)|(1<<portc_sign2_pin)|(1<<portc_sign3_pin);
    }
}

```

```

PORTC = Portc_x;
PORTA = (1<<A_ind)|Uop_pins; // ind pin + OPamp to 1. others to 0
TRISA = ~((1<<RA4)|(1<<A_ind)); // RA4 pin + ind pin to out. others to in.
Uop_off; // Uop to off
Mos_off;
PIE1.TMR1IE = 0; // disable int.
asm sleep; // out by WDT
ADCON1 = 0x80; // RIGHT JAST.; PORTA TO ANALOG
ADCON0 = (A_direct<<3)|0b10000001; // Fosc/32, A_direct, ON
Delay_us(40);
ADCON0.GO = 1; // start
while (ADCON0.GO); // wait to conversions end

if (((ADRESL<10)||((ADRESL>150))&&(!x)) break;// if x=0
//exit if closed probes or plug in
// the charged capacitor
if ((ADRESL>10)&&(x)) break;// if x<>0 exit if opened probes
}
PORTA = Uop_pins ; // Uop pins to 1. others to 0
Uop_on; // Uop to on
if (f_lowest==0) // sleep is not by low battery?
    TimeSec = 0; //
else {
    TimeSec = 8; // prepare battery test
    f_indbat = 0; //
}
f_sleep = 0; //reset sleep flag
PIE1.TMR1IE = 1;
}
// Measuring the battery voltage
void batt_test(void) {
    f_indbat = 1;
    ADCON1 = 0x80; // RIGHT JAST.; PORTA TO ANALOG
    ADCON0 = (A_bat<<3)|0b10000001; // Fosc/32, A_bat, ON
    Delay_us(50);

```

```

        // measure battery voltage -----
    TRISC                                     |=
(1<<portc_sign0_pin)|(1<<portc_sign1_pin)|(1<<portc_sign2_pin)|(1<<portc_sign3_pin);
    TRISB = 0xFF;        // make to free pin A_ind
    PORTA = Uop_pins;    //
    TRISA &= ~(1 << A_bat); // discharge
    U1_on;    // full load
    TRISA |= (1 << A_bat); // to input
    Delay_us(100);
    ADCON0.GO = 1;      // start
    while (ADCON0.GO);  // wait to conversions end
    U1_off;    // load off
    TRISC                                             &=
~((1<<portc_sign0_pin)|(1<<portc_sign1_pin)|(1<<portc_sign2_pin)|(1<<portc_sign3_pin));
    TRISB = 0;        // all pins to back
    U_bat = (ADRESH<<8)+ADRESL;
    U_bat = (long)U_bat * 330 / 1024 + 2;

        // Flags of batt. setting -----
    if (U_bat<110) f_low = 1; // <1.1v => low batt.
        else f_low = 0;
    if (U_bat<=100) f_lowest = 1; // <=1v => very low
        else f_lowest = 0;
    }
    // mOhmmeter procedure
    // work if measuring res. by U1 within 3 sec.
    char mOhmmeter(void) {
    unsigned int U_offset, R_min = 950;
    char R_full = 0, Rmin, i;
    ADCON1 = 0x80; // RIGHT JAST.; PORTA TO ANALOG
    ADCON0 = (A_OPAMP<<3)| 0b10000001; // Fosc/32, A_OPAMP, ON
    Delay_us(50);
        Cap_10[7]=_d;
        Cap_10[6]=_i;

```



```

    Cap_10[5]=_r;
    Cap_10[4]=_Bottom;    // 'dir_'
    Res_10[7]=_r;
    Res_10[6]=_E;
    Res_10[5]=_S;
    Res_10[4]=_Bottom;    // 'rES_' direct resistant measurement
U3_on;
for (i=0; i<40; i++) {
    pause_ms(100);
    ADCON0.GO = 1;    // start
    while (ADCON0.GO);    // wait to conversions end
    if (ADRESH == 0x03) break; // exit if probes not conn.
}
U3_off;
if (i==40) return 0; // return if probes connected 4s after message
                    // to calibration

w_space();
pause_s(1);
U1_off;
U2_off;
U3_off; // switch off any current
Mos_on; // mosfet to on for Voffset measuring
ADCON1 = 0x80; // RIGHT JAST.; PORTA TO ANALOG
ADCON0 = (A_OPAMP<<3)| 0b10000001; // Fosc/32, A_OPAMP, ON
Pause_ms(125);
U_offset = average_10(1);
if (U_offset > 100) return 0; // error - out
Mos_off;
U1_on;    // measuring current U1 to on
while (1){
    pause_ms(125);
    pause_ms(125);
    Res_ = average_10(1);
    if (Res_ < U_offset) break; // error - out
    if (Res_ > 900) R_full = 1; // overflow

```

```

else R_full = 0;
Res_ -= U_offset;
Res_ = (unsigned long)Res_ * 100 / Cali;//
if (Res_ > Res0) Res_ -= Res0;    // correction for probes and
    else Res_ = 0;                // U1 current
if (R_full) Res_ = 999;
if (Res_ <= R_min) { // Test for Rmin
    R_min = Res_;
    Rmin = 1;
}
else Rmin = 0;
    // Not flashed indication Res.
int_to_ind(Res_, &Res_10);
Res_10[2+4] |= Hs; //comma
Res_10[3+4] = _r; // 1-st is 0. Replace with 'r'
if (R_full) Res_10[0+4] = _Top; // overflow indicator
if (Rmin) Res_10[0+4] |= Hs; //comma for Rmin ind.
int_to_ind(Res_, &Cap_10);
Cap_10[2+4] |= Hs; //comma
Cap_10[3+4] = _r; // 1-st is 0. Replace with 'r'
if (R_full) Cap_10[0+4] = _Top; // overflow indicator
if (Rmin) Cap_10[0+4] |= Hs; //comma for Rmin ind.
if (!R_full) TimeSec = 0;
if (TimeSec > Dir_Res_Time_Limit) break; // exit by time of opened probes
}
Mos_off;
U1_off; // switch off current
}
// THE MAIN PROCEDURE
void main() {
    char mflag, x; // mflag - measuring result flag
    OPTION_REG = 0b00001011;// pullup on, prescaler -8 to WDT. (wdt period ~0.15s)
    TRISC
    =
    ~((1<<<portc_Mos_pin)|(1<<<portc_sign0_pin)|(1<<<portc_sign1_pin)|(1<<<portc_sign2_pin)|(1<<<p
    ortc_sign3_pin));

```

```

// common and mosfet control to out
TRISC.RC2 = 0;
// ----- test for common anode or cathode -----
Portc_x = 0; PORTC = Portc_x;
ADCON1 = 4; // LEFT JAST.; PINS 0,1,3 PORTA TO ANALOG
ADCON0 = (A_ind<<3)| 0b10000001; // Fosc/32, A_ind, ON
Delay_us(500);
ADCON0.GO = 1; // start
while (ADCON0.GO); // wait to conversions end

f_anode = 0; // cathode
if (ADRESH > 230) f_anode = 1; // anode
if (f_anode==0) PORTB = 0;
else PORTB = 1; // ind. off
Portc_x |= ((portc_U1_pin)|(portc_U2_pin)|(portc_U3_pin)); // U1, U2, u3 pins to HI
PORTC = Portc_x;

if (EEPROM_Read(0)!= 0) { // Inic. or read EEPROM-----
EEPROM_Write(0,0);
EEPROM_Write(1,100); // calibration coeff. (100+-50)
EEPROM_Write(2,0); // the probes resistance =0
Cali = 100;
Res0 = 0;
}
else {
Cali = EEPROM_Read(1);
Res0 = EEPROM_Read(2);
} // -----

TRISB = 0;
PORTA = (1<<RA4)|Uop_pins ; // Uop and RA4 pin to 1. others to 0
TRISA = ~(1<<RA4); // RA4 pin to out
Uop_on; // OPAMP power to on
OPTION_REG.F7 = 1; // PULL UP OFF
T1CON = 0x31; // prescaler -8, int. clock, TMR1 ON
INTCON = 0B11000000; // ON, PEIE ON

```

```
PIE1.TMR1IE = 1; // TMR1 INT. ON //period 512 us (USED ONLY TMR1L)
```

```
while(1){ // the bace cycle
  if (TimeSec.F3==1) {
    if (f_indbat==0){
      f_indbat==1;
      batt_test(); // 1 time each 16s
    }
  }
  else f_indbat = 0;
      // ----- to sleep -----
  if (f_lowest==1) to_sleep(0); // too low batt. => sleep
  if (f_sleep==1) { //sleep flag is set within 1 min => sleep (or 10s if batt. is low)
    if ((TimeSec > Time_to_sleep) || ((TimeSec > 10)&&(f_low==1))) {
      to_sleep(0);
    }
  }
      // ----- to calibration -----
  if ((f_calib==1)&&(TimeSec >= Time_to_calibrate)) { //calib. flag is set within 20s =>
calib.
    f_calib=0;
    if (mOhmmeter()) continue; // abort if direct res. measurement
    if (!calibration()) {
      w_error();
      w_space(); // blank the ind
      pause_s(1);
      to_sleep(1); // sleep by connecting probes
    }
    else w_end();
    TimeSec = 0;
  }
  mflag = in_test(); // first test of the connected element
  if (! mflag) { // if =0 - not connected
    w_notconnect();
    f_calib = 0;
  }
}
```

```

avarige_2(255, &Res_); // Saved values to null
if (f_sleep==0){ // if lost connection in just moment
    f_sleep = 1; // set sleep flag
    TimeSec = 0; // and reset seconds timer
}
continue;
}
else f_sleep = 0;
if (mflag == 2) { // if =3 - discharging of ionistor
    w_ionistor();
    continue;
}

// C, R or ESR measuring area -----
mflag = measure();
if (mflag.F7 == 1) { // out of range
    w_out();
    continue;
}

// Resistant to ind. -----
x = mflag & 0x03;
avarige_2(mflag, &Res_); // avarige with previous
if (Res_ > 999) {
    if (x==0) Res_ = 999; // max
    else {Res_ /= 10; x--;} // change limit for 3-digit result
}
int_to_ind(Res_, &Res_10);
Res_10[3+4] = _r; // 1-st is 0. Replace with 'r'
if ((Res_10[2+4] == _O)&&(x!=2)){ //blank not significant zero
    Res_10[2+4] = _Space;
    if ((Res_10[1+4] == _O)&&(x==0)) Res_10[1+4] = _Space;
} //--
if (x != 0) Res_10[x +4] |= Hs ; // set comma
// Capacitance to ind
if (mflag.F4 == 1) { // resistor
    Cap_10[7]=_Bottom;

```

```

Cap_10[6]=_r;
Cap_10[5]=_E;
Cap_10[4]=_S;    // '_rES'
if (f_calib==0){ // if the probes is connected now directly or resistor
    f_calib = 1; // set calibration flag
    TimeSec = 0; // and reset seconds timer
}
continue;
}
else f_calib = 0;
if (mflag.F5 == 1) { // Capasitor
    avarige_2(mflag, &Cap_); // avarige with previous
    int_to_ind(Cap_, &Cap_10);
    if (Cap_10[3+4] == _O) {
        Cap_10[3+4] = _c; // c if 1-st is 0
        if (Cap_10[2+4] == _O) Cap_10[2+4] = _Space;
    }
    if (mflag.F6 == 0) Cap_10[1 +4] |= Hs ; // set comma
}

if (mflag.F3 == 1) { // ionistor
    if (Cap_ < 1000) {
        int_to_ind(Cap_, &Cap_10);
    }
    else {
        Cap_10[6]=Gen_[9];
        Cap_10[5]=Gen_[9]; // _
        Cap_10[4]=_Top; // '99 ' if >999
    }
    Cap_10[3+4] = _F; //
    Cap_10[3+4] |= Hs; // 'F.xxx'
}
} //----- End of base cycle -----}

// INTERRUPTS
void interrupt(void) {

```

```

unsigned char To_portc=0;
static unsigned char Segment = 1, SignNo = 0;    // column of indicator
static unsigned char *Digit; // BCD to indicator pointer (Res_10 or Cap_10)
if (PIR1.TMR1IF == 1){
    TMR1H = 0xFF; // period 255
    Timer +=1; // 0.5 ms counter (8 bit)
    if (Timer==0){
        TimeCount +=1; // 128 ms counter (8 bit), total - 32s
        if((TimeCount & 0x07) == 0) TimeSec +=1; // Seconds counter
    }
    // Data update block -----
    if ((Timer == 0)&&((0x03 & TimeCount) == 0)){
        if (TimeCount.F2 == 0) Digit = &Res_10;
        else Digit = &Cap_10;
        *(Digit) = *(Digit+4);
        *(Digit+1) = *(Digit+5); // show within 0.5 s
        *(Digit+2) = *(Digit+6); // for both numbers
        *(Digit+3) = *(Digit+7);
    } // -----
    if (Segment.F7 == 0) Segment <<= 1;
    else {Segment = 1;
        SignNo++;
        if (SignNo >3) SignNo = 0;
    } // rotate left for each 4 sign
    To_portc =
(1<<portc_sign0_pin)|(1<<portc_sign1_pin)|(1<<portc_sign2_pin)|(1<<portc_sign3_pin);
    if (f_anode==0){ // for common cathode -----
        To_portc = Portc_x | To_portc; // PORTC >> CATHODE pins to 1, others not
changed
        if(SignNo == 0) To_portc &= (~(1 << portc_sign0_pin));
        if(SignNo == 1) To_portc &= (~(1 << portc_sign1_pin));
        if(SignNo == 2) To_portc &= (~(1 << portc_sign2_pin));
        if(SignNo == 3) To_portc &= (~(1 << portc_sign3_pin));
        // clear current cathode pin
        PORTB = 0; // IND. off

```

```

Portc_x = To_portc; PORTC = Portc_x; // to portc

PORTB = (*(Digit+SignNo)) & Segment; // set to on current segment
}
else { // for common anode -----
    To_portc = Portc_x & (~To_portc); // PORTC >> ANODE pins to 0, others not
changed
    if(SignNo == 0) To_portc |= (1 << portc_sign0_pin);
    if(SignNo == 1) To_portc |= (1 << portc_sign1_pin);
    if(SignNo == 2) To_portc |= (1 << portc_sign2_pin);
    if(SignNo == 3) To_portc |= (1 << portc_sign3_pin);
        // set current anode pin
    PORTB = 0xFF; // IND. off
    Portc_x = To_portc; PORTC = Portc_x; // to portc
    PORTB = ~(*(Digit+SignNo)) & Segment; // set to on current segment
} //-----
PIR1.TMR1IF=0; // clear flag TMR0IF
}
}

```



ДОДАТОК Д  
Перелік елементів

Формат	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кіл.	Примітки
				<u>Документація</u>		
A4				Перелік елементів	3	
				<u>Стандартні вибори</u>		
				Винт М3х12 – 001		
				ГОСТ 1489-62	4	
				Гайка М4х3.2-011		
				ГОСТ 5927-62	2	
				<u>Інші вироби</u>		
				Гальванічний елемент		
				ААА	1	ВТ1
				Конденсатори		
				К10-17Б 1500пФ Х7R, 10%, 0805	1	С1
				<b>ХАІ.560.001.НП</b>		
Изм	Лист	№ докум.	Підп	Д		
Розробив		Тростянко			Лит.	Л.
Перевірів		Олійник			н	1
						Листів
						4
Н. конт.					ХАІ 560м гр. 2024 р.	

Формат	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кіл.	Примітки
				Кер. ЧІП конд. 10мкФ Х5R, 10% 6.3В	3	C2, C4,C7
				K10-17Б імп. 47пФ NPO, 5%, 0805	1	C3, C5
				ЕСАР (К50-35 міні), 220 мкФ, 10В	1	C6
				Конд.кер. 22пФ, NPO, 50В, +/- 5%	2	C8-C9
				Мікроконтролер		
				Pic16f873a	1	DD1
				Підсилювачі		
				MCP6022	1	DA1
				NCP1402SN33	1	DA2
				Індикатор		
				LCD 1602	1	HL1
				Індуктивність		
				47мкГн ¼ Вт 0307 10%	1	L1
				7мН 0.205А d-2.5 L-6	1	L2
				Резистори		
				5Вт 3.3 Ом 5%	1	R1
				2 Вт 680 Ом 5%	1	R2
				0.5 Вт 2 Ом 5%	1	R3
				<b>XAI.560.001.НП</b>		Лист 2
ЗМ	Лист	№ докум.	Підп.	Д		

Формат	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кіл.	Примітки
				0.25 Вт 1.2Мом 5%	1	R4
				2 Вт 200 Ом 5%	1	R5
				0.5 Вт 2.4 кОм 5%	1	R6
				2 Вт 75 кОм 5%	1	R7
				0.5 Вт 3кОм 5%	1	R8
				2 Вт 220 Ом 5%	1	R9
				1.5 Вт 33 кОм	1	R10
				1 Вт 1кОм 5%	1	R11
				2 Вт 180 Ом 5%	1	R12
				1.5 Вт 10 кОм 5%	2	R13,R14
				Винтова колодка		
				ЗВІ-5	1	S1
				Діоди		
				HER508	2	VD1,VD2
				1N4728A	1	VD3
				1N5817	2	VD4,VD5
				Транзистор		
				IRLML2502	1	VT1
				Кварцевий резонатор		
				КХ-К 16.0 MHz	1	X1
				<b>XAI.560.001.НП</b>		Лист 3

