

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА**

**ФАКУЛЬТЕТ РАДІОФІЗИКИ ЕЛЕКТРОНІКИ ТА КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ**

**Кафедра радіотехніки та радіоелектронних систем**

До захисту допущено:

«На правах рукопису»

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_ Ігор АНІСІМОВ

18 травня 2023 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА**

на тему:

**«Оригінальний кондуктометричний датчик ємнісного типу для  
вимірювання електропровідності рідин високочастотним  
Z-метричним методом»**

**Виконав:**

студент 2-го курсу магістратури

денної форми навчання

спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка

ОНП «Інформаційна безпека телекомунікаційних систем і мереж»

Гоз Святослав Олександрович \_\_\_\_\_

**Науковий керівник:**

к.ф.-м. н., доц. Бех Ігор Іванович \_\_\_\_\_

**Рецензентка:**

к.б.н., с.н.с. Демченко Віолетта Федорівна \_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цій магістерській роботі

немає запозичень з праць інших авторів без

відповідних посилань

Студент \_\_\_\_\_

Робота допущена до захисту в ЕК рішенням кафедри радіотехніки та радіоелектронних систем від 18 травня 2023 р., протокол № 18.

Завідувач кафедри радіотехніки та радіоелектронних систем,

доктор фіз.-мат. наук, професор

Анісімов Ігор Олексійович \_\_\_\_\_

## РЕФЕРАТ

Наукова робота магістра містить: 62 ст., 45 рис., 13 табл., 13 джерел.

В теоретичній частині роботи наводиться інформація щодо каналів витоку інформації, зокрема матеріально-речовинних каналів витоку. Розглянуто типові конструкції спеціалізованих датчиків, які дозволяють проводити ідентифікацію окремих елементів в хімічних сполуках, основні методи вимірювання електропровідності речовин. На основі цих етапів роботи обрано конкретний тип датчика та метод вимірювання. В практичній частині наведено результати комп'ютерного моделювання роботи еквівалентної схеми датчика, його розгортку, етапи виготовлення та результати дослідження оригінального датчика.

Ключові слова: матеріально-речовинні канали витоку інформації, аналітична хімія, кондуктометричний датчик.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
РОЗДІЛ 1. КАНАЛИ ВИТОКУ ІНФОРМАЦІЇ. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ	8
РОЗДІЛ 2. КОНДУКТОМЕТРІЯ. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ.....	13
РОЗДІЛ 3. ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ Z-МЕТРИЧНИМ МЕТОДОМ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ВИСОКОЧАСТОТНОЇ ЄМНІСНОЇ КОМІРКИ.....	24
РОЗДІЛ 4. МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ЕКВІВАЛЕНТНОЇ СХЕМИ С-КОМІРКИ В ПРОГРАМНОМУ ЗАСТОСУНКУ MICRO-CAP 12.0.....	28
РОЗДІЛ 5. ВИГОТОВЛЕННЯ КОНДУКТОМЕТРИЧНОГО ДАТЧИКА ЄМНІСНОГО ТИПУ .....	38
РОЗДІЛ 6. КАЛІБРУВАННЯ КОНТАКТНИХ ДАТЧИКІВ TDS METER V1.0 ТА EC METER V1.0 ДЛЯ ARDUINO.....	43
РОЗДІЛ 7. ДОСЛІДЖЕННЯ ОРИГІНАЛЬНОГО КОНДУКТОМЕТРИЧНОГО ДАТЧИКА ЄМНІСНОГО ТИПУ.....	56
ВИСНОВКИ.....	60
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	61

## ВСТУП

Інформація є невід'ємною складовою життєдіяльності людини. Швидкі темпи розвитку науки та техніки роблять інформацію ще більш цінною для людства. Кожній клітині, щоб забезпечити виживання свого виду, необхідні потоки інформації як від інших клітин, так і від навколишнього середовища. Факт знання глибинних інформаційних процесів в людині несе одночасно благо і загрозу. З одного боку наслідком цього є покращення якості життя людини, адже вона може почувати себе зручніше в сьогоdnішньому світі. З іншого боку, зростає можливість управління людиною навіть без її відома та всупереч її бажанню [1].

В ринкових умовах інформацію також слід вважати товаром, ба більше, ціна такого товару може відповідати ціні найдорожчих видів продукції або навіть її перевищувати. Тому захист інформації від несанкціонованої модифікації, перехоплення або знищення стає все більшою проблемою. Також варто зазначити, що в умовах ринку та відкритості інформації стає складніше розрізнити закриту інформацію та інформацію, яка може вільно розповсюджуватись. Для прикладу підприємства, які займаються розробкою військової техніки, повинні, згідно із законами ринку, рекламувати її, а це вже відкриває «завісу» секретності [2].

Питання захисту інформації являє собою велику проблему, яка на даний момент ще є недостатньо дослідженою, та велику цінність, частина якої ще навіть не має чітких меж визначеності [2].

Більшого значення набуває інженерно-технічний захист інформації. Це обумовлено такими факторами як:

- створення методів та технічних засобів, що з кожною спробою забезпечують несанкціоноване отримання все більшого обсягу інформації, знаходячись при цьому на деякій відстані від її джерел;

- застосування нової елементної бази для отримання інформації, завдяки досягненням в мікроелектроніці. Поява замаскованих та мініатюрних технічних засобів виявлення інформації спростило задачу несанкціонованого доступу до даних, і таким чином збільшило кількість бажаючих вдатись до протизаконних дій;
- оснащення житлових, службових приміщень, автомобілів різноманітними радіоелектронними приладами, наявність в яких певних фізичних процесів, може призвести до витоку приватної інформації [3].

Технічні канали витоку інформації прийнято класифікувати залежно від фізичної природи їх утворення. Зокрема, існують так звані матеріально-речовинні канали витоку інформації, до яких відносять речовини в твердому, рідкому, газоподібному або корпускулярному (наприклад, радіоактивні речовини) стані [4].

Матеріально-речовинні канали витоку інформації характерні своїм різноманіттям, що викликає необхідність у вдосконаленні старих та створенні нових технічних засобів для їх виявлення та протидії [4]. Це потребує використання методів виявлення окремих елементів, що входять до складу речовин.

Ще в 19 ст. вчені заснували галузь, яка забезпечувала методики визначення хімічних елементів та сполук у речовинах – аналітичну хімію [5]. На сьогодні аналітична хімія є наукою про методи визначення хімічного складу речовин та їх структури, а також про способи ідентифікації хімічних сполук. Вона займається розробкою теоретичних основ методів аналізу, визначає межі їх застосування, пропонує методи аналізу різних речовин. Станом на зараз методи аналітичної хімії застосовуються в різних галузях науки та техніки, наприклад, в молекулярній біології, біохімії, дослідженнях і аналізі харчових продуктів, фармацевтичних препаратів, матеріалів особливого ступеня чистоти, об'єктів навколишнього середовища тощо [6].

В аналітичній хімії виділяють хімічні, фізичні та фізико-хімічні методи. Останні ще прийнято називати інструментальними. Хімічні методи засновані на хімічних реакціях в розчинах, твердих речовинах, газах та розплавах. Фізичні методи характеризуються тим, що при проведенні аналізу склад речовини, яка аналізується, є незмінним. Що ж до фізико-хімічних методів, то в них досліджується залежність між хімічним складом речовини та певною її фізичною властивістю. Поміж фізико-хімічних методів найчастіше застосовують так звані електрохімічні методи, перш за все завдяки їх різноманіттю, високій чутливості та точності результатів, безінерційності, можливості автоматизації та швидкості проведення аналізу [7].

В сучасному електрохімічному аналізі увага все більше зосереджується на вирішенні проблем екології, аналізі біологічних і медичних об'єктів. При цьому актуальним завданням стає конструювання спеціалізованих датчиків, які б дали змогу отримати відгук при контактуванні електроду з молекулами речовини або їх фрагментами [8].

Кондуктометрія є одним з поширених електрохімічних методів аналізу. Під даним терміном розуміють методи аналізу, що засновані на вимірюванні електропровідності електролітів, які можуть знаходитись у вигляді водних або неводних розчинів, колоїдних розчинів або розплавів [7]. Методи кондуктометрії використовуються в роботі аналізаторів у стічних водах, при визначенні концентрацій синтетичних добрив в зрошувальних системах, при оцінці якості питної води тощо [9].

Існують контактні та безконтактні кондуктометричні датчики. При застосуванні контактних досліджувана речовина знаходиться в прямому гальванічному контакті з електродами датчика. Безконтактні датчики характеризуються тим, що при їх застосуванні речовина, яка досліджується, зв'язана з вимірювальним колом через ємність або індуктивність. Основною перевагою контактних датчиків є те, що вони дають кращу точність вимірювання. Але це буде відповідати дійсності лише за умови, що на

електродах відсутні поляризаційні явища, які вносять додаткові похибки в результат вимірювання. Окрім цього для виготовлення контактних датчиків необхідні дорогі матеріали, такі як золото або платина. До того ж при роботі з хімічно агресивними розчинами є великий ризик руйнування контактів датчика. В той же час, у безконтактних датчиків відсутні поляризаційні явища, і їх застосовують для вимірювання електропровідності концентрованих розчинів або для роботи в агресивних середовищах [7].

Маркетингові дослідження та робота з літературою показали, що безконтактні кондуктометричні датчики практично відсутні на ринку. Тому переді мною було поставлено завдання розробити оригінальний кондуктометричний датчик ємнісного типу для вимірювання електропровідності рідин високочастотним  $Z$ -метричним методом та дослідити його роботу.

## РОЗДІЛ 1. КАНАЛИ ВИТОКУ ІНФОРМАЦІЇ. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Під витоком інформації розуміють несанкціоновану передачу інформації від її джерела до зловмисника. Причини витоку інформації можуть бути такі: поширення населенням; втрата носіїв інформації; передача інформації за допомогою полів, речовин в твердому, рідкому та газоподібному станах, або потоками елементарних частинок [10].

Каналом витоку інформації є паразитний, неконтрольований шлях поширення інформації від джерела за межі кола осіб або інформаційної системи, що призводить до неправомірного отримання цієї інформації сторонніми особами.

Технічним каналом витоку інформації (ТКВІ) називається сукупність джерела інформації, середовища поширення інформації та технічних засобів розвідки (ТЗР) противника.

Залежно від фізичної природи, технічні канали витоку інформації класифікуються наступним чином:

- візуально-оптичні канали – візуальне спостереження, яке може бути або безпосереднім, або віддаленим із застосуванням спеціальних технічних засобів. Перенесення інформації відбувається за допомогою світла, що випромінюється джерелом інформації, або відбивається від нього у видимому, ультрафіолетовому або інфрачервоному діапазонах;
- віброакустичні канали – канали, в яких перенесення інформації відбувається шляхом поширення звукових коливань, які можуть знаходитись в інфразвуковому (до 16 Гц), чутному (від 16 Гц до 20 кГц) або ультразвуковому (більше за 20 кГц) діапазонах. Середовищем поширення звукових коливань можуть бути повітря,

земля, вода, конструкції будівлі (а саме стіни, вікна, металева арматура, залізобетон тощо);

- радіоелектронні канали – канали, в яких перенесення інформації відбувається шляхом поширення електромагнітних хвиль в радіочастотному діапазоні, або за допомогою струму, що проходить через джерело живлення чи по колам заземлення.
- матеріально-речовинні канали – канали, в яких витік може відбуватись через різноманітні матеріали в рідкому, твердому, корпускулярному та газоподібному станах.

Роботи над вдосконаленням дальності прийому інформації стали причиною виникнення шляхів витоку інформації, в яких сполучені вище наведені канали, прикладами є: акустооптичний, радіоакустичний канали тощо.

В результаті аналізу літератури, було виявлено, що наразі увага зосереджується на візуально-оптичних, віброакустичних та радіоелектронних каналах витоку інформації, в той час як матеріально-речовинним каналам може бути присвячена лише невелика стаття або огляд. Проте, відходи виробничої та трудової діяльності також можуть використовуватись засобами противника для здобуття інформації. Такими відходами можуть бути фрагменти документів, зіпсовані накладні, чернетки, браковані деталі та ін. Серед подібних джерел чільне місце посідають залишки озброєння та військової техніки на полігонах.

На рис. 1.1 наведена класифікація матеріально-речовинних каналів витоку інформації.



Рис. 1.1. Класифікація матеріально-речовинних каналів витоку інформації.

Інтерес до матеріально-речовинних каналів обумовлений специфікою джерел та носіїв інформації відносно інших каналів. В них джерелами та носіями інформації є люди (суб'єкти), мікрочастинки та макротіла (матеріальні об'єкти). Витік інформації відбуватиметься тоді, коли люди та матеріальні тіла з інформацією фізично переміщуються за межі контрольованої зони [2].

При організації захисту інформації потрібно враховувати певні особливості, характерні для витоку інформації при порівнянні з розкраданням матеріальних об'єктів [3]:

- витік інформації неможливо виявити шляхом зменшення кількості інформації джерела. Це обумовлено тим, що витік даних не підкоряється законам збереження матерії;
- витік інформації має місце лише тоді, коли інформація потрапляє до зловмисника;
- збільшення кола споживачів внаслідок витоку інформації, зменшує її ціну.

При розгляді конкретних матеріально-речовинних каналів витоку інформації, одним з основних виділяють рідке середовище. Через нього можуть переноситись всі види інформації, демаскуючі та семантичні речовини [4]:

- семантичною є інформація, що міститься на схемах, кресленнях, чернетках документів;
- до демаскуючих речовин належать газоподібні, тверді та рідкі відходи виробництва.

Як правило, у межах матеріально-речовинного каналу ведеться радіаційна та хімічна розвідка. Щоб отримати демаскуючі речовини, найчастіше достатньо взяти проби речовин в рідкій, твердій та газоподібній фазі. Коли мова йде про повітряні середовища, то тут розвиваються активні та пасивні процедури та засоби аналізу речовин. Під активними засобами розуміють посилення лазерного променя до повітряної суміші, яка досліджується, отримання спектру випромінювання результатів взаємодії та його аналіз. На противагу цьому, в пасивних методах проводиться аналіз спектру власного випромінювання речовини [4].

Матеріально-речовинні канали витоку інформації можуть утворитись також при зливах у водойми рідких або викидах в атмосферу газоподібних демаскуючих речовин. Такі канали можуть зустрітись на підприємствах, в яких технологічні процеси супроводжуються використанням або створенням рідких та газоподібних речовин, наприклад, в фармацевтичній, хімічній, парфумерній галузях [10].

У разі появи можливості отримання демаскуючих речовин через викрадення зловмисниками зразків землі, води, повітря тощо, формуються аналогічні канали витоку. Варто відзначити, що демаскуючі речовини, які перебувають у твердому або у газоподібному станах, можуть поширюватись на відстані від одиниці до десятків км, а це є достатнім для потрапляння їх зразків до зловмисників. Подібні міркування справедливі і для випадку рідких відходів.

Неважко зрозуміти, що при віддаленні демаскуючих речовин від джерела зменшується їх концентрація, однак, у разі їхнього витоку протягом тривалого проміжку часу концентрація може зазнати примноження в землі,

рослинності, підводній фауні та флорі, і в результаті стати більшою за дозволені значення.

Відходи можна продати для виробництва іншої продукції, очистити перед утилізацією в водойми, знищувати або «поховати» для розпаду або саморуйнування на невизначний проміжок часу. Останні операції застосовуються для високотоксичних речовин та радіоактивних відходів, які не можна знищити іншими способами та для яких інші шляхи утилізації не є раціональними [2].

Витік інформації для випадку радіоактивних речовин може реалізовуватись в результаті винесення радіоактивних речовин співробітниками підприємства, а також реєструватись зловмисниками шляхом використання спеціальних пристроїв. Дальність каналу витоку в цьому разі є порівняно невеликою: вона складає кілька метрів для  $\alpha$ -випромінювання, кілька сантиметрів для  $\beta$ -випромінювання, та кілька сотень метрів для  $\gamma$ -променів.

Для того щоб визначити чи потребують ознаки продукції, що містять дані, кращого рівня захищеності, потрібно провести хімічний, фізичний та фізико-хімічний аналіз. Основою хімічного аналізу є хімічні реакції в досліджуваному розчині. У випадку фізичного аналізу вивчають зміну фізичних характеристик даних, яка викликана речовиною, що досліджується. При застосуванні фізико-хімічних методів, вимірюють варіацію фізичних величин, що спричинена певними хімічними реакціями [3].

Через велику кількість та розмаїття матеріально-речовинних каналів витоку інформації, виникає потреба у створенні нових та вдосконаленні наявних технічних засобів для їх виявлення та моніторингу [4].

## РОЗДІЛ 2. КОНДУКТОМЕТРІЯ. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Як уже зазначалося вище, аналітична хімія займається вивченням принципів та методів визначення хімічного складу речовин, вона включає в себе кількісні та якісні методи аналізу.

Застосування методів аналітичної хімії можливе як на якісному, так і на кількісному рівні. Якісний аналіз – це сукупність методів визначення хімічного складу речовини за допомогою ідентифікації атомів, йонів, молекул, які входять до її складу. До показників, що характеризують якісний аналіз належать чутливість та специфічність. Під специфічністю мають на увазі здатність методу виявляти потрібну речовину за наявності інших елементів. Чутливістю є найменша кількість речовини, яку може виявити конкретний метод [11]. В кількісному аналізі використовують методи визначення кількісних співвідношень, що описують окремі елементи та з'єднання в досліджуваній речовині. До показників кількісного аналізу відносяться: чутливість, точність та специфічність. Одиницями вимірювання точності та чутливості є відсотки вмісту досліджуваної речовини в пробі [3].

Основу хімічних методів складають окислювально-відновлювальні, кислотно-основні реакції та реакції утворення комплексів. Існують також методи, що засновані на вимірюванні залежності швидкості хімічної реакції від концентрації речовин, які взаємодіють, їх названо – кінетичні хімічні методи. Поряд із традиційними хімічними, використовуються також фізичні, фізико-хімічні та біологічні методи [3].

Основними з них є класичні гравіметричний і тетриметричний методи. Гравіметричний метод заснований на виділенні, за допомогою осадження чи відгону, речовини в чистому вигляді та її зважуванні. Основою тетриметричного методу є вимірювання кількості реагенту, що витрачається на реакцію з досліджуваною речовиною [2].

Термічними називають методи, які використовують процеси виділення, поглинання тепла в результаті дії фізичних процесів, або термічні ефекти, що є наслідками хімічних реакцій [3].

Методи аналізу, які використовують процеси, що протікають на поверхнях електродів, або в приелектродному просторі, називаються електрохімічними. Вони поділяються на прямі та непрямі. Прямі полягають у використанні зв'язку між силою струму (потенціалом) та концентрацією речовини, а непрямі – на пошуку залежності певного електричного параметра від об'єму розчину з відомою концентрацією (титранту) [3].

Електрохімічні методи займають чільне місце серед фізико-хімічних методів. Одним із найбільш поширених електрохімічних методів є кондуктометрія, яка базується на вимірюванні електропровідності електролітів: різноманітних розчинів чи розплавів [7].

Залежно від механізму протікання електричного струму, всі провідники класифікуються на: електронні, іонні та змішані. Носіями заряду в електронних провідниках є електрони, до цієї групи відносяться: метали, напівпровідники, металеві сплави, оксиди, вуглець, а також деякі тверді солі. В іонних провідниках носіями заряду є іони, а проходження струму супроводжується перенесенням речовини. До цієї групи можна віднести електроліти та газу. Речовини, що мають частково електронну і частково іонну провідність, належать до класу змішаних провідників. Прикладами таких речовин є:  $\beta$ -модифікація сульфідів срібла, розчини лужних і лужноземельних металів в рідкому аміаку, бромиста мідь тощо.

Загалом область вимірювання електропровідності охоплює класи іонних та змішаних провідників. Сюди можна віднести такі речовини [7]:

- 1) чисті речовини в твердому стані (галогеніди срібла, барію, свинцю і інших металів), в рідкому стані (вода, спирти, кислоти), розплавлені солі і гідриди;

2) розчини одного або кількох речовин в твердому стані, в розплаві, колоїдні та рідкі водні і неводні розчини в неорганічних і органічних розчинниках: оксидів, солей кислот, основ.

Кондуктометрична комірка (датчик) є доволі складним елементом пристрою вимірювання електропровідності. Це пояснюється тим, що її конструкція має відповідати вимогам, які висуваються як з електрохімічного, так і електричного боку. Питома електропровідність  $\chi$  іонних провідників описується виразом:

$$\chi = \frac{L}{S} \cdot \frac{1}{R}, \quad (2.1)$$

де  $\frac{L}{S}$  – константа кондуктометричної комірки. Тут  $L$  – це довжина посудини для вимірювання, а  $S$  – площа її поперечного перерізу.

Через те, що для обчислення електропровідності розчину із використанням даного виразу потрібно знати величину  $\frac{L}{S}$ , яку прийнято називати константою комірки, виникають труднощі, позаяк її важко визначити прямим вимірюванням довжини посудини та площі її поперечного перерізу. На це в свою чергу існує низка причин [7]:

- а) розсіювання силових ліній електричного поля, які не обмежуються стовпчиком електроліту, що знаходиться між електродами;
- б) неможливість забезпечити точно паралельне розташування електродів і строго певну їх форму;
- в) складність форми самої ємності з розчином, що обмежує поширення силових ліній електричного поля.

Саме тому, щоб визначити константу комірки застосовують розчини, для яких величина електропровідності відома з великою точністю.

Прикладом можуть слугувати водні розчини хлористого калію. Значення питомої електропровідності хлористого калію для різних концентрацій наведено в таблиці 2.1 [7]. Отже, комірка заповнюється розчином хлористого калію з відомою величиною  $\chi$ , після цього вимірюється опір комірки, а

константа  $\frac{L}{s}$  обчислюється з добутку  $\chi$  на опір  $R$ .

Таблиця 2.1.

**Стандартні величини питомої електропровідності розчинів хлористого калію**

Концентрація	Кількість KCL, г, на 1000 г розчину, приведенного до вакууму	Електропровідність, $\text{См} \cdot \text{см}^{-1}$ ( $T=0^\circ \text{C}$ )	Електропровідність, $\text{См} \cdot \text{см}^{-1}$ ( $T=18^\circ \text{C}$ )	Електропровідність, $\text{См} \cdot \text{см}^{-1}$ ( $T=25^\circ \text{C}$ )
1	71,3828	0,06543	0,098201	0,111733
0,1	7,43344	0,0071543	0,0111919	0,0128862
0,01	0,746558	0,00077512	0,00122269	0,00141145

Кожен метод, що застосовуються в кондуктометрії має індивідуальні властивості, такі як: тип контакту з досліджуваною речовиною, тип перетворення сигналу, робоча напруга або струм, метод, що покладений в основу вимірювального пристрою тощо. На рис. 2.1 наведено класифікацію методів кондуктометрії. Залежно від типу вихідного сигналу методи поділяються на аналогові і частотні (або дискретні). До складу аналогових відносять контактні та безконтактні. Дискретні також бувають контактні, безконтактні або комбіновані. В свою чергу аналогові контактні поділяються на: контактні за постійним струмом та змінним струмом, а безконтактні за змінним НЧ та ВЧ струмом [7].

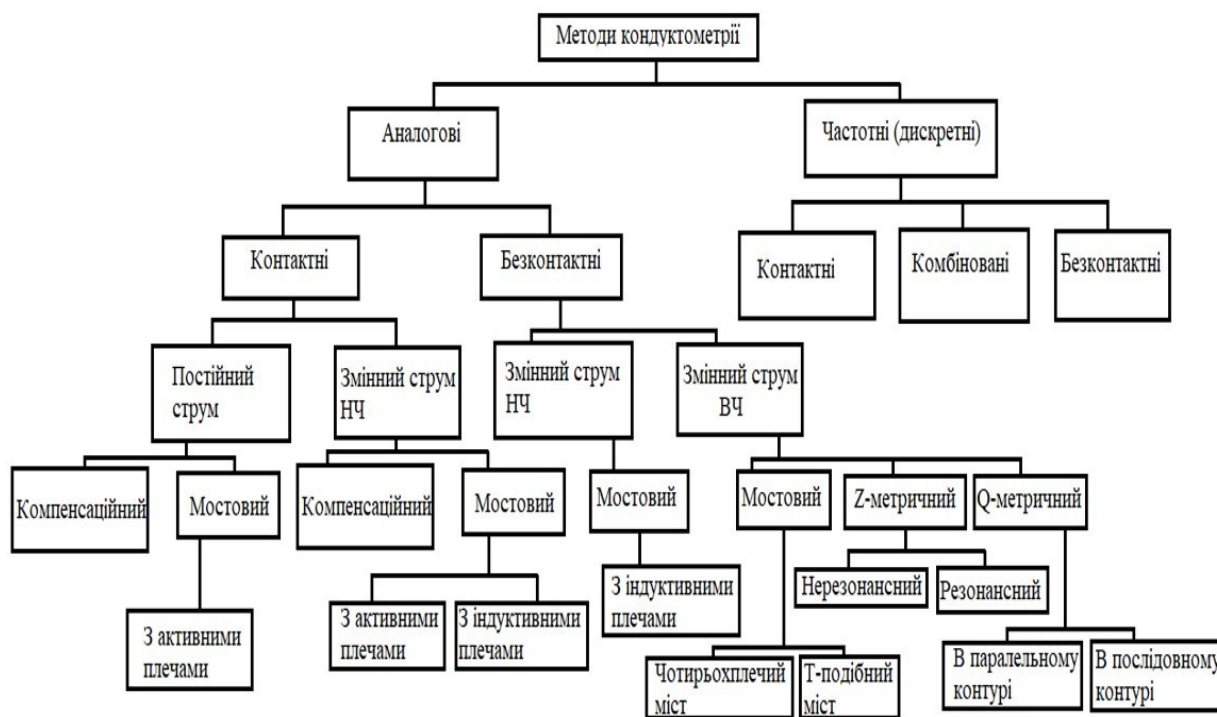


Рис. 2.1. Класифікація методів кондуктометрії [7].

На рис. 2.2 зображена типова конструкція низькочастотної кондуктометричної комірки. В даній комірці дві колби з розчином з'єднуються за допомогою спеціальної трубки. Подібна конструкція дозволяє промивати комірку за допомогою переливання розчину між колбами при нахилах, а також перемішувати сам розчин [7].

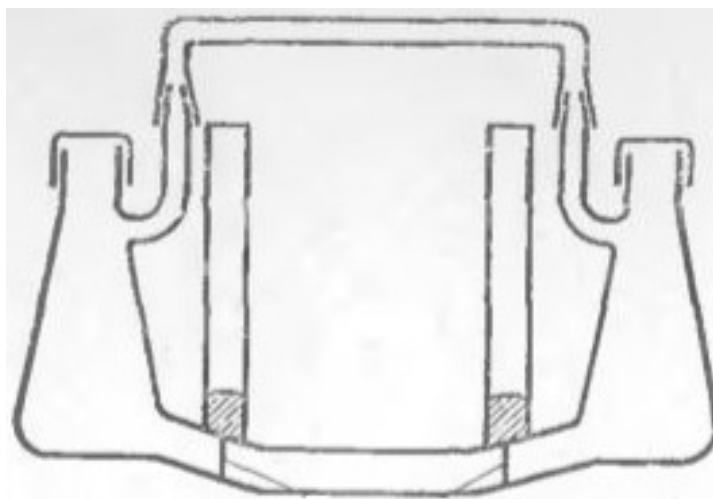


Рис. 2.2. Загальний вигляд двоелектродної комірки [7].

Поміж високочастотних комірок найбільшого використання набули ємнісні (або С-комірки) та індуктивні (або L-комірки). Типова конструкція

ємнісної комірки наведена на рис. 2.3, а на рис. 2.4 – конструкція індуктивної комірки.

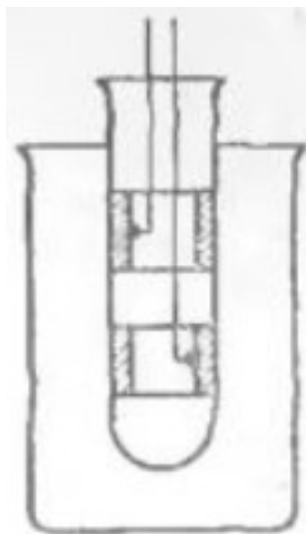


Рис. 2.3. Конструкція ємнісної комірки [7].

Тут ємнісна комірка має контактну систему електродів, в даному випадку вони закріплені на внутрішній поверхні центральної трубки. Така реалізація дає можливість підтримувати температуру комірки та повітря навколо неї у заданих межах. Проте даний варіант вимагає дотримуватись точного розташування центральної трубки по відношенню до зовнішньої посудини під час вимірювання, а також при повторних вимірюваннях, бо інакше можуть відбутись зміни константи комірки [7].

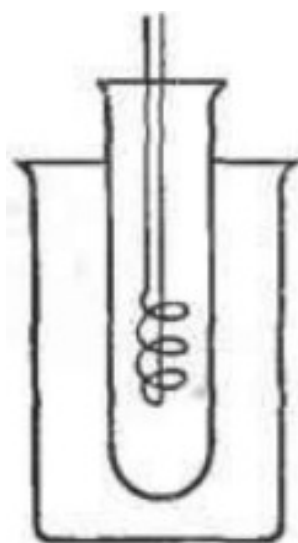


Рис. 2.4. Конструкція індуктивної комірки [7].

Індуктивна комірka також є контактною. Температуру розчину, що досліджується, можна легко підтримувати в заданих межах. Окрім цього розчин знаходиться під дією периферійного магнітного поля котушки [7].

Окрім L- та C-комірок, доволі поширеними є різні варіанти чотириплечих мостів. Причиною цього є простота конструкції, можливість вимірювати опір в межах від кількох Ом до кількох МОм, а також низькі значення похибки вимірювання (в межах 0,001%). Таким чином існує три класи вимірювальних мостів: врівноважені, неуврівноважені та квазіуврівноважені. При застосуванні врівноважених мостів, схема приводиться до стану рівноваги в результаті виконання певних регулювань. Зміна напруги джерела живлення мосту, не впливає стан рівноваги [7]. На рис. 2.5 зображена функціональна схема чотириплечого врівноваженого мосту.

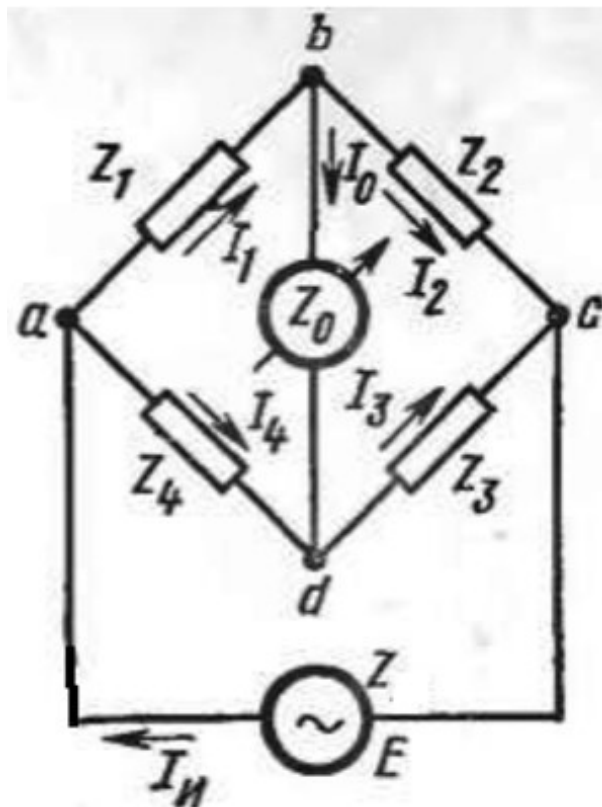


Рис. 2.5. Функціональна схема чотириплечого врівноваженого мосту [7].

Як видно з рис. 2.5, схема мосту має в своєму складі чотири комплексних опори  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$  і  $Z_4$ , показчик рівноваги з внутрішнім опором  $Z_0$ , джерело

змінної напруги  $E$  з внутрішнім опором  $Z$ . Струм у вимірювальній діагоналі описується наступним виразом:

$$I_0 = \frac{(Z_2 Z_4 - Z_1 Z_3) E}{A}, \quad (2.2)$$

де

$$A = Z_0 Z (Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4) + Z_0 (Z_1 + Z_2) (Z_3 + Z_4) + Z (Z_1 + Z_4) (Z_2 + Z_3) + Z_1 Z_2 Z_3 + Z_1 Z_2 Z_4 + Z_1 Z_3 Z_4 + Z_2 Z_3 Z_4$$

Струм у вимірювальній діагоналі дорівнюватиме нулю лише за умови:

$$Z_2 \cdot Z_4 = Z_1 \cdot Z_3. \quad (2.3)$$

Тому для того, щоб привести міст до стану рівноваги необхідно регулювати два параметри: модуль та фазу комплексних опорів. Відповідно, регулювання активної складової призводить до врівноваження за модулем, а реактивної – за фазою [7].

Високочастотні методи вимірювання електропровідності почали з'являтися ще у 1929 р. Їх особливістю є можливість застосування ємнісних, індуктивних, контактних та комбінованих комірок. Загалом існують: мостовий,  $Z$ -метричний та  $Q$ -метричний методи. На рис. 2.6 зображено функціональну схему мостового методу вимірювання.

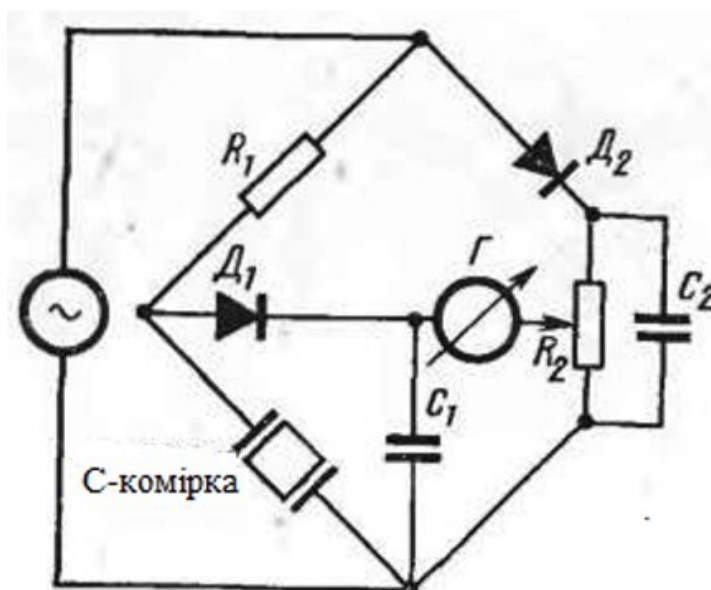


Рис. 2.6. Функціональна схема мостового методу вимірювання [7]. Особливістю даної схеми є те, що два плеча мосту з опором  $R_1$ , та  $C$ -коміркою вмикаються в коло змінного струму високої частоти, а два інших плеча знаходяться в колі постійного струму. Врівноваження відбувається за постійним струмом, через діод  $D_1$  та ламповий гальванометр. Врівноваження мосту здійснюється одним регулюванням.

Q-метричні методи найчастіше використовуються для високочастотного титрування. В даних методах можна використовувати, як ємнісні, так і індуктивні комірочки, що вмикаються в паралельний або послідовний коливальний контур. Ідея полягає в тому, що зміна електропровідності розчину призводить до зміни величина розсіюваної потужності в коливальному контурі, а це в свою чергу змінює добротність контуру ( $Q$ ). Зміни добротності можна зафіксувати за змінами величини струму, що протікає через контур, струму генераторної лампи, або змінами напруги на коливальному контурі. На рис. 2.7 зображені функціональні схеми паралельного та послідовного коливальних контурів, які використовуються для Q-метричних методів вимірювання.

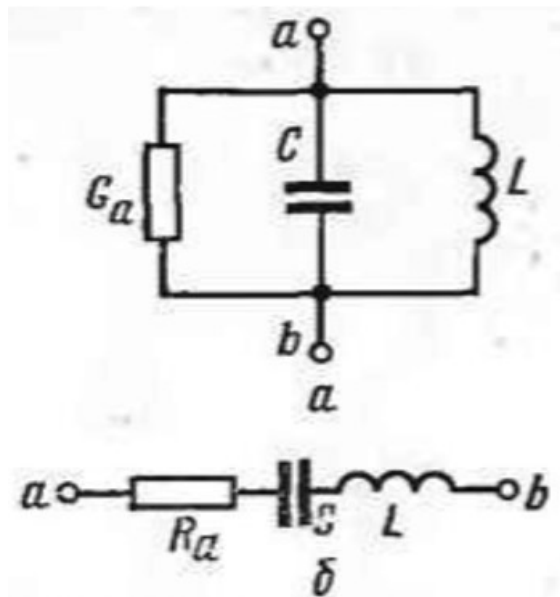


Рис. 2.7. Функціональні схеми коливальних контурів, які використовуються для Q-метричних методів вимірювання: а) паралельний; б) послідовний [7].

Як відомо, при прикладанні до затискачів  $a$  та  $b$  паралельного контуру напруги з частотою  $\omega$ , через контур потече струм, мінімум якого спостерігатиметься, коли резонансна частота коливань контуру дорівнюватиме частоті напруги від зовнішнього джерела. Якщо до послідовного контуру прикладається напруга із зовнішнього джерела, то тоді на резонансній частоті буде спостерігатися мінімум напруги. Те на скільки зменшиться струм або напруга при резонансі буде залежати від добротності коливального контуру, а вона визначається як відношення реактивного опору до активного опору контуру. З цього випливає те, що при вимірюванні з індуктивною коміркою, зміни добротності контуру будуть обумовлені змінами добротності L-комірки (втрати в конденсаторі контуру малі і залишаються постійними в процесі вимірювання). А якщо застосовується ємнісна, то зміни добротності контуру пов'язані зі змінами втрат та ємності в C-комірці.

При застосуванні Z-метричного методу, C-комірка, що має повний опір  $Z$ , вмикається в коло синусоїдального змінного струму з незмінною частотою. В процесі вимірювання фіксуються змінами величини струму через комірку або величини падіння напруги на комірці, після чого визначають величину зміни повного опору комірки або провідності. У даному методі фазовий кут між напругою та струмом не береться до уваги. Як правило, Z-метричний метод застосовується тоді, коли потрібна швидкість відліку, або коли мають справу з тривалим неперервним записом певного процесу в часі, і висока точність результатів не є головним пріоритетом.

В результаті роботи з літературою було визначено, що серед всіх наявних методів кондуктометрії, найбільш широко використовуються високочастотні методи. Це пояснюється можливістю використання, ємнісних, індуктивних, контактних та комбінованих комірок, а також високою чутливістю. Порівняно із індуктивними, ємнісні комірки мають

простішу конструкцію, менші габарити та вагу приладу. В Q-метричному методі можуть бути використані, як C-комірки, так і L-комірки, тоді як в Z-метричному лише C-комірки. Проте Z-метричний метод дозволяє проводити вимірювання електропровідності як розчинів, що добре проводять електричний струм, так і розчинів, що погано проводять електричний струм. Окрім цього чутливість при вимірюваннях Z-метричним методом можна значно підвищити, якщо C-комірку увімкнути в послідовний або паралельний коливальний контур, налаштований в резонанс з частотою напруги зовнішнього джерела. Тому було прийнято рішення обрати серед високочастотних методів Z-метричний, в якому застосовується ємнісна комірка.

### РОЗДІЛ 3. ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ Z-МЕТРИЧНИМ МЕТОДОМ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ВИСОКОЧАСТОТНОЇ ЄМНІСНОЇ КОМІРКИ

На рис. 3.1 зображена схематична конструкція високочастотної ємнісної комірки.

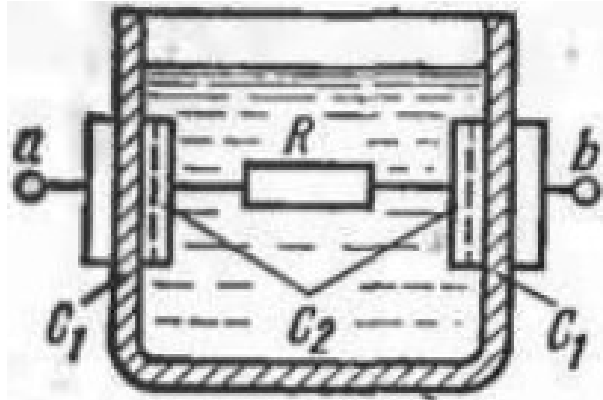


Рис. 3.1. Схематична конструкція ємнісної високочастотної комірки [7].

Найпростішою реалізацією ємнісної комірки є посудина з діелектрика у вигляді трубки. Дана трубка має із зовнішнього боку два або більше металевих електроди (кільцевих, прямокутних або круглих), які з'єднуються в точках *a* та *b* з джерелом змінної напруги. Дві зовнішні металеві обкладинки та утворені електролітом дві внутрішні обкладинки, розташовані навпроти металевих, утворюють два конденсатори  $C_1$  однакової ємності, діелектриком в яких є стінки посудини. Дві внутрішні «обкладинки» утворюють ємність  $C_2$ , діелектриком в якій слугує шар електроліту з діелектричною проникністю  $\varepsilon_2$ . Ємність  $C_2$  характеризується опором  $R$  електроліту, який можна прийняти за опір втрат конденсатора [7].

На рис. 3.2 зображена еквівалентна схема ємнісної комірки.

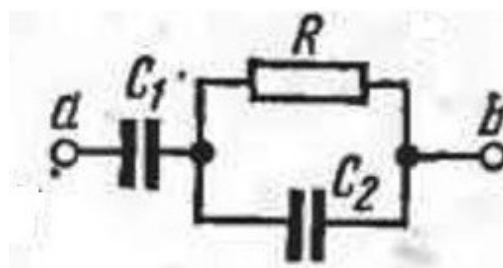


Рис. 3.2. Еквівалентна схема С-комірки [7].

На даному рисунку дві ємності  $C_1$  були замінені однією, удвічі меншої величини. Ємність  $C_1$  є незалежною від властивостей розчину, який досліджується. Як правило опором втрат ємності  $C_1$  нехтують, так як він має дуже велике значення та не залежить від властивостей досліджуваного розчину. Величину ємності  $C_1$  визначають розміри зовнішніх електродів, діелектрична проникність матеріалу посудини та товщина її стінок [7]:

$$C_1 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 S_1}{d_1}, \quad (3.1)$$

де  $S_1$  – площа електродів,  $\varepsilon_1$  – діелектрична проникність матеріалу стінок,  $d_1$  – товщина стінок посудини,  $\varepsilon_0$  – абсолютна діелектрична проникність вакууму, рівна  $8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м.

Ємність конденсатора  $C_2$  пов'язана із площею зовнішніх електродів, відстанню між обкладинками, відносною діелектричною проникністю розчину та діелектричною проникністю вакууму співвідношенням [7]:

$$C_2 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_2 S_2}{d_2}, \quad (3.2)$$

де  $S_2$  – площа зовнішніх електродів,  $\varepsilon_2$  – відносна діелектрична проникність досліджуваного розчину,  $d_2$  – відстань між обкладинками.

Z-метричний метод дозволяє зобразити схему у вигляді двох варіантів. На рис. 3.3 зображено функціональну схему для вимірювання електропровідності Z-метричним методом, що відповідає розчинам, що добре проводять електричний струм, при постійній напрузі джерела, тобто коли внутрішній опір джерела живлення значно менший за внутрішній опір комірки, а на рис. 3.4 – характеристичні криві Z-метричного методу.

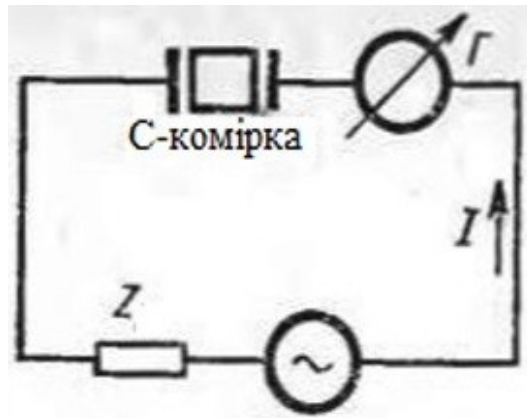


Рис. 3.3. Функціональна схема для вимірювання електропровідності Z-метричним методом, що відповідає розчинам, які добре проводять електричний струм [7].

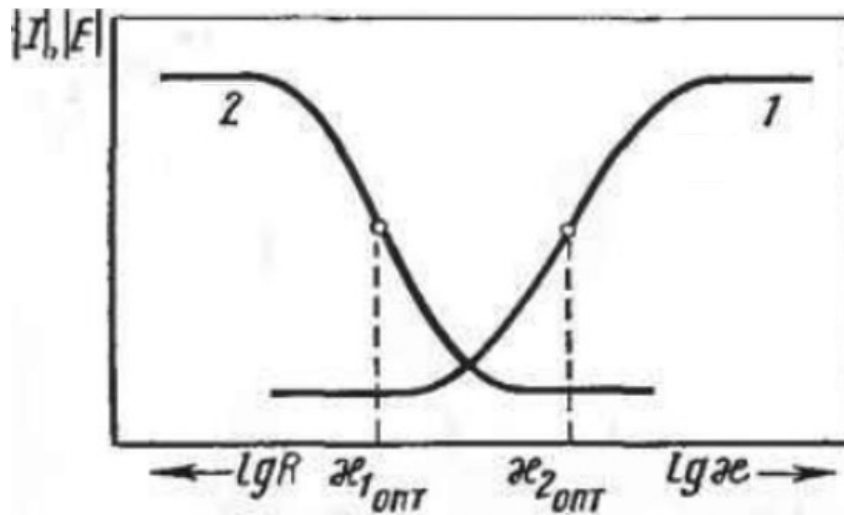


Рис. 3.4. Характеристичні криві Z-метричного методу:  
1- для схеми на рис 2.3; 2 - для схеми на рис. 2.5 [7].

В цьому випадку вимірюється залежність величини струму через комірку від омичного опору (електропровідності чи концентрації) розчину. Цю залежність можна представити кривою 1 на рис. 3.4. Якщо прийняти, що  $C_2 = 0$ , а це є допустимим при великій відстані між електродами С-комірки, можна знайти, що дійсна частина повного опору комірки дорівнюватиме  $R$ , а уявна  $-1/(\omega \cdot C)$ . В цьому випадку при незмінній величині інших параметрів повний опір С-комірки визначатиметься лише величиною омичного опору розчину:  $Z = R$ . При малій величині цього опору, опір комірки буде малим, а відповідно струм великим. При великому опорі  $R$  струм буде малим.

На рис. 3.5 зображено функціональну схему для вимірювання електропровідності  $Z$ -метричним методом, що відповідає випадку погано провідних розчинів, при незмінній величині струму через комірку, тобто коли внутрішній опір джерела значно більший внутрішнього опору комірки.

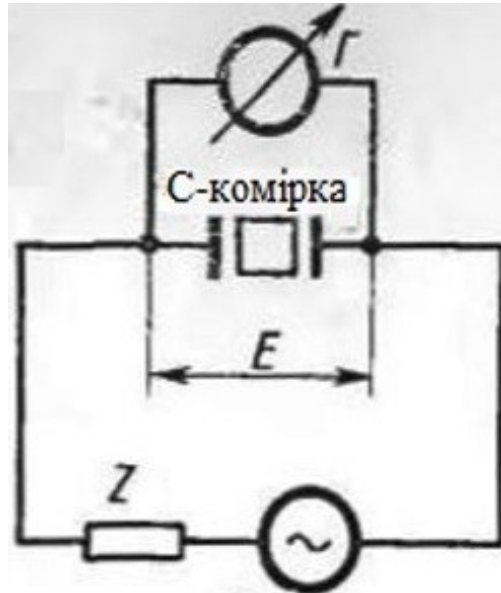


Рис. 3.5. Функціональна схема для вимірювання електропровідності  $Z$ -метричним методом, що відповідає розчинам, які погано проводять електричний струм [7].

Вимірюється залежність спаду напруги на комірці ( $E$ ) від омичного опору (електропровідності або концентрації) розчину. Ця залежність представлена кривою 2 на рис. 3.4. Напруга  $E$  дорівнюватиме добутку струму, що протікає через комірку, на повний опір комірки, який дорівнюватиме омичному опору  $R$ . Коли значення  $R$  мале, напруга на комірці  $E$  також мала, і, навпаки, при великому значенні  $R$  напруга на комірці велика [7].

## РОЗДІЛ 4. МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ЕКВІВАЛЕНТНОЇ СХЕМИ С-КОМІРКИ В ПРОГРАМНОМУ ЗАСТОСУНКУ MICRO-CAP 12.0

На рис. 4.1 зображено принципову схему для вимірювання електропровідності  $Z$ -метричним методом, що відповідає розчинам, які добре проводять електричний струм (див. рис. 3.3), зібрану в програмному застосунку Micro-Cap 12.0. Вихідним сигналом є падіння напруги на опорі  $R1$  та конденсаторі  $C2$ .

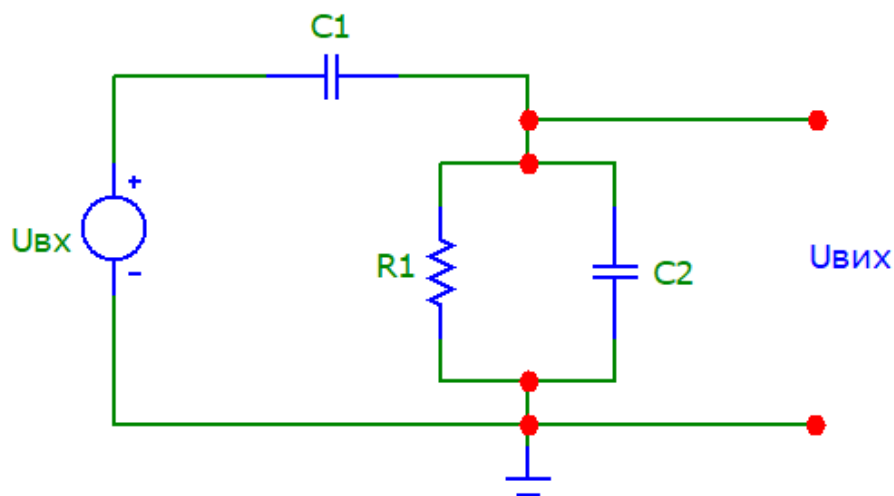


Рис. 4.1 Принципова схема для вимірювання електропровідності  $Z$ -метричним методом, що відповідає добре провідним розчинам, зібрана в програмному застосунку Micro-Cap 12.0.

Перед початком комп'ютерного моделювання елементам схеми було присвоєно такі номінали:  $R1 = 1$  Ом,  $C1 = 100$  нФ,  $C2 = 100$  нФ. Далі було вирішено проаналізувати вплив опору комірки на вихідну напругу, для цього значення опору  $R1$  змінювалось від 0.1 Ом до 10 Ом. На вхід схеми було подано змінну напругу амплітудою 1 В та частотою 500 кГц. На рис. 4.2 зображено графік залежності вихідної напруги від опору  $R1$ .

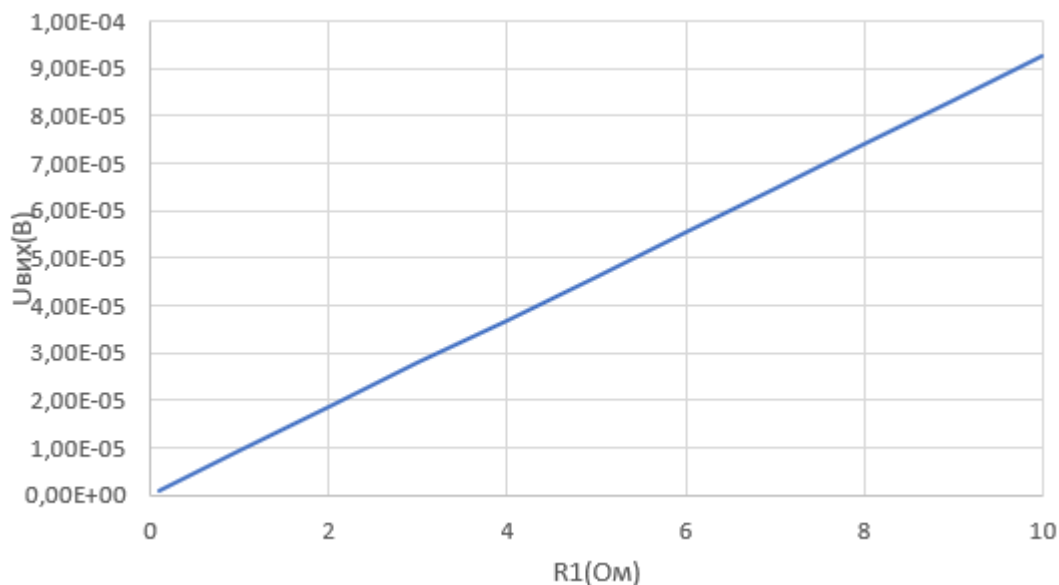


Рис. 4.2. Графік залежності вихідної напруги від опору розчину R1.

З графіку видно, що при зростанні опору розчину R1 напруга на виході комірки також зростає. Це можна пояснити тим, що при зростанні R1, зростає й повний комплексний опір розчину, тому на більша частина вхідної напруги буде спадати саме на розчині.

Значення опору R1 було встановлено рівним 1 Ом. Після цього було проведено моделювання роботи схеми при різних значеннях ємностей C1 та C2. На рис. 4.3 зображено графік залежності вихідної напруги від ємності C2.

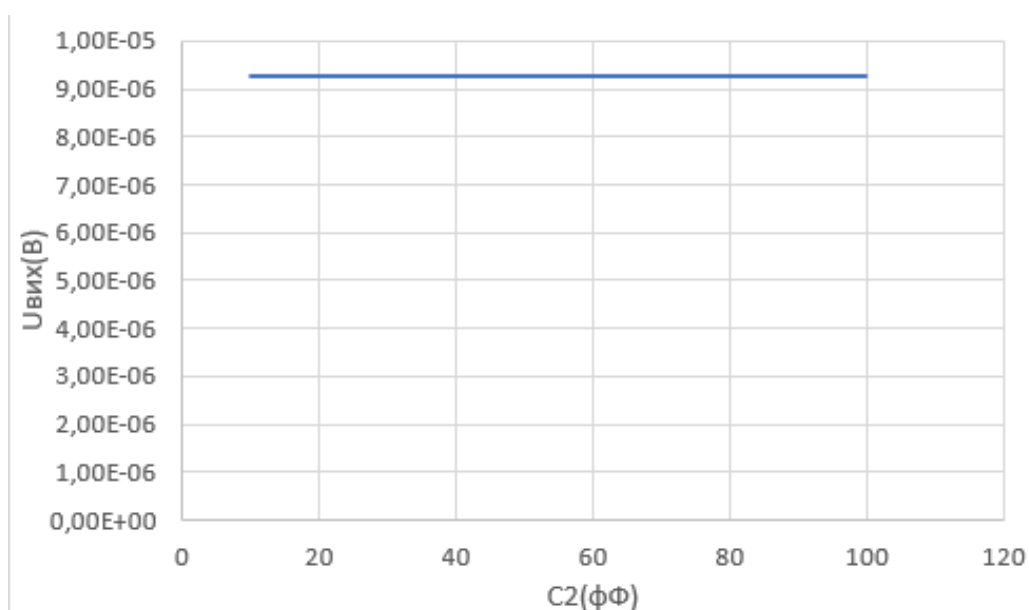


Рис. 4.3. Графік залежності вихідної напруги від ємності розчину C2.

Як видно з рис. 4.3 що збільшення ємності  $C2$  не впливає на зміну вихідної напруги.

Було вирішено залишити ємність  $C2$  рівною 100 нФ та провести моделювання із зміною  $C1$ . На рис. 4.4 зображено графік залежності вихідної напруги від ємності  $C1$ .

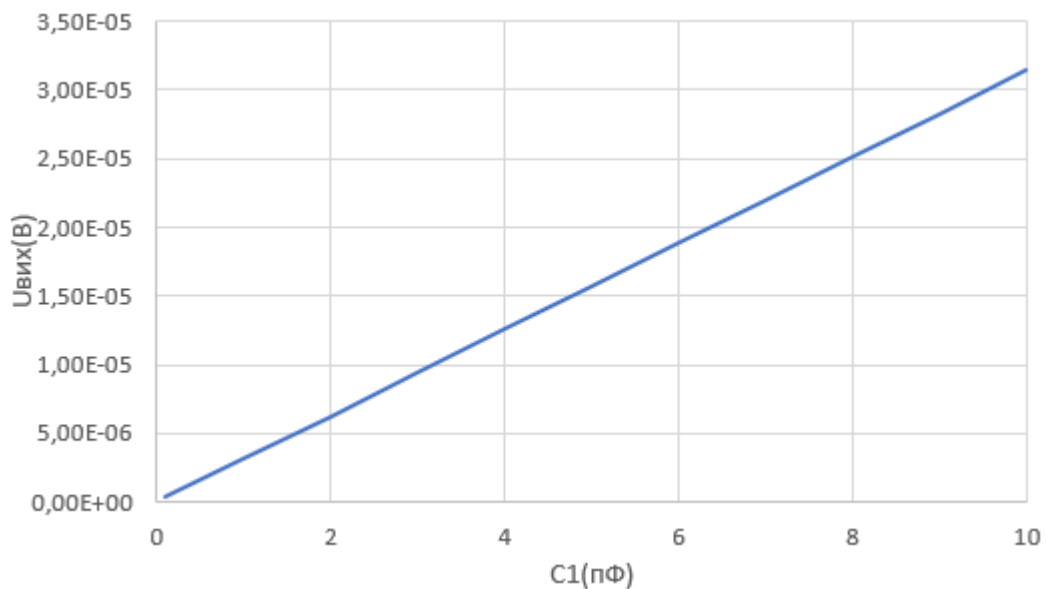


Рис. 4.4. Графік залежності вихідної напруги від ємності  $C1$ .

З графіку на рис. 4.4 видно, що збільшення ємності  $C1$  призводить до збільшення вихідної напруги. Якщо ємність  $C1$  зростає, її реактивний опір зменшується, зменшується й падіння напруги і більша частина вхідного сигналу надходить на вихід схеми. Значення ємності  $C1$  було встановлено рівним 1010 нФ.

На рис. 4.5 зображена осцилограма вихідної напруги при  $R1=1$  Ом,  $C1=1010$  нФ,  $C2=100$  нФ.

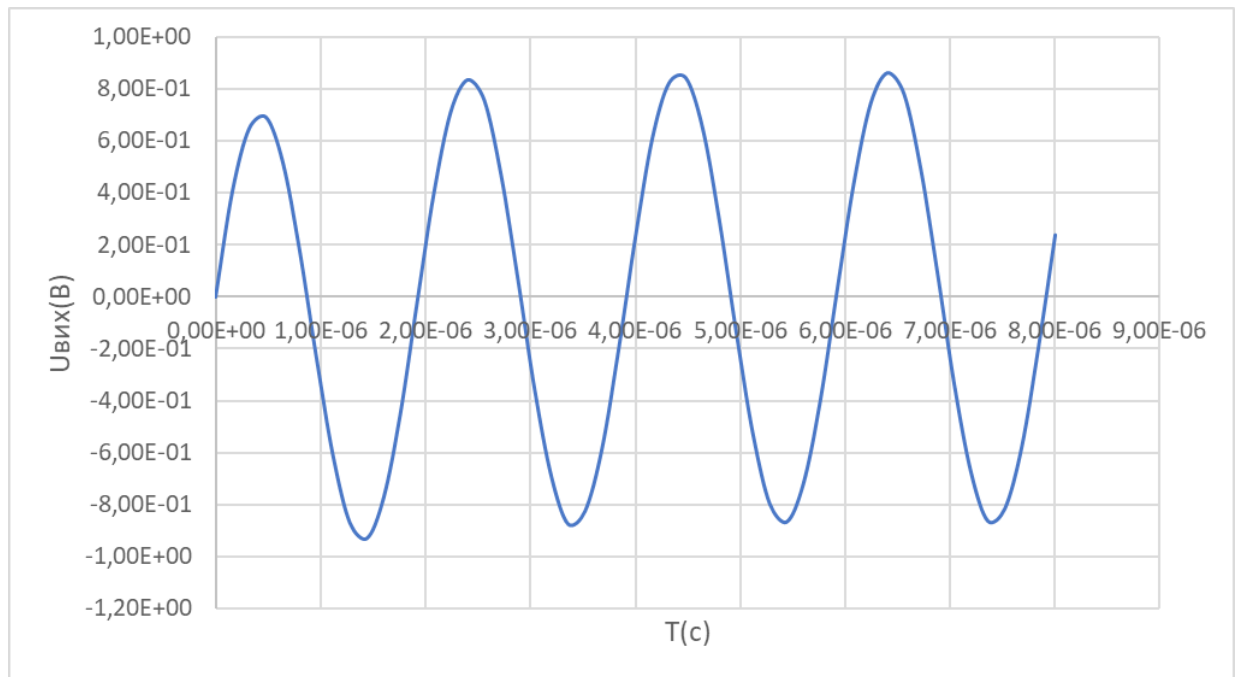


Рис. 4.5. Графік вихідної напруги кондуктометричної комірки.

При параметрах  $R_1=1$  Ом,  $C_1 = 1010$  нФ,  $C_2 = 100$  нФ, амплітуда вихідного сигналу становила 864,478 мВ.

На наступному етапі роботи за виразом (3.1) (див. розділ 3) було визначено площу зовнішніх електродів. Для скла діелектрична проникність  $\epsilon_1$  становить 4 – 7, товщину стінок посудини  $d_1$  було покладено рівною 1,5 мм, а ємність  $C_1$  взято рівною 1010 нФ.

$$S_1 = \frac{d_1 C_1}{\epsilon_0 \epsilon_1} = \frac{1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1010 \cdot 10^{-9}}{5 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}} = 34,2 \text{ м}^2$$

Через велике значення площі було прийнято рішення зменшити ємність  $C_1$  до значення 70 пФ. Така зміна призвела до зменшення амплітуди вихідної напруги до 43,89 мкВ. Площа електродів при цьому становила:

$$S_1 = \frac{1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 70 \cdot 10^{-12}}{5 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}} = 0,002372 \text{ м}^2 = 23,72 \text{ см}^2.$$

За виразом (3.2) (див. розділ 3) було визначено площу внутрішніх електродів. В цьому випадку потрібно враховувати діелектричну проникність

розчину  $\varepsilon_2$ , для спрощення було прийнято, що комірка замість розчину заповнена повітрям, діелектрична проникність якого дорівнює 1. Відстань між обкладинками  $d_2$  було покладено рівною 15 мм.

$$S_2 = \frac{15 \cdot 10^{-3} \cdot 100 \cdot 10^{-9}}{1 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}} = 169,49 \text{ м}^2.$$

В цьому випадку було вирішено зменшити ємність  $C_2$  до 1,5 пФ, площа електродів при такій зміні становила:

$$S_2 = \frac{15 \cdot 10^{-3} \cdot 1,5 \cdot 10^{-12}}{1 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}} = 0,002542 \text{ м}^2 = 25,42 \text{ см}^2.$$

З отриманих значень видно, що у випадку квадратних обкладинок, їх розміри мають бути 5 х 5 см. Масо-габарити такого датчика не задовольняють умовам поставленого завдання. Для спрощення обрахунків було вирішено взяти за основу трубку квадратного перерізу. При цьому, виходячи із наявних матеріалів, було прийнято рішення, що площа однієї квадратної обкладинки конденсатора не має перевищувати 1 см<sup>2</sup>. Тому було покладено  $S_1 = S_2 = 1 \text{ см}^2$ . Після цього було розраховано ємності  $C_1$  та  $C_2$ :

$$C_1 = \frac{5 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1 \cdot 10^{-4}}{1,5 \cdot 10^{-3}} = 2,95 \text{ пФ}$$

$$C_2 = \frac{1 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1 \cdot 10^{-4}}{15 \cdot 10^{-3}} = 0,059 \text{ пФ} = 59 \text{ фФ}.$$

Після встановлення оптимальних параметрів схеми було проведено часовий аналіз роботи схеми. На рис. 4.6 зображено осцилограму вихідної напруги після налаштувань параметрів.

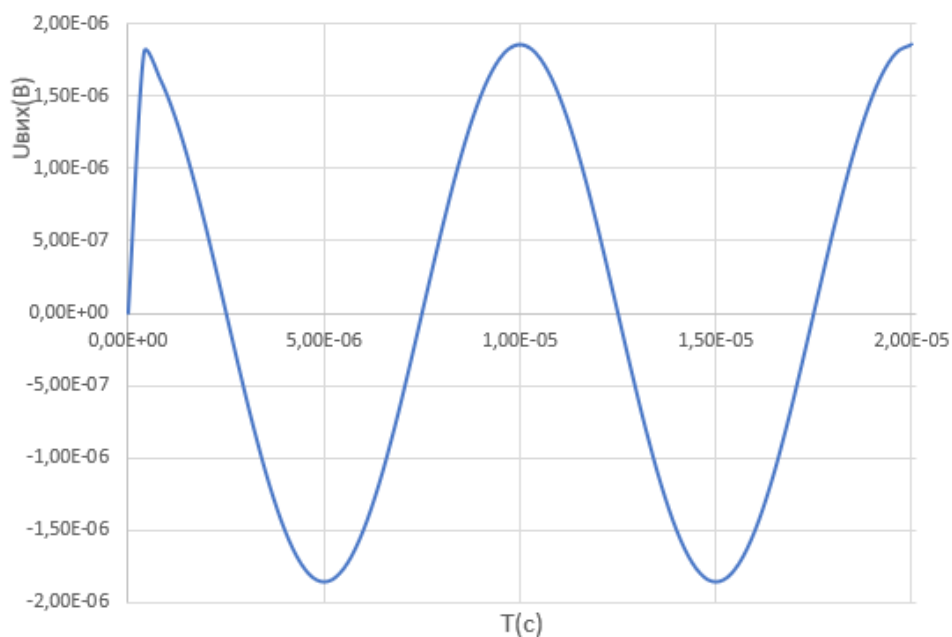


Рис. 4.6. Графік вихідної напруги кондуктометричної комірки.

Зміни величин ємностей  $C1$  та  $C2$  призвели до суттєвого зменшення амплітуди вихідної напруги, нове значення якої становило  $1,854$  мкВ.

Далі було проведено аналіз за змінним струмом та побудовано амплітудно-частотну характеристику (АЧХ) фазово-частотну характеристику (ФЧХ). На рис. 4.7 зображено АЧХ схеми, а на рис. 4.8 — ФЧХ.

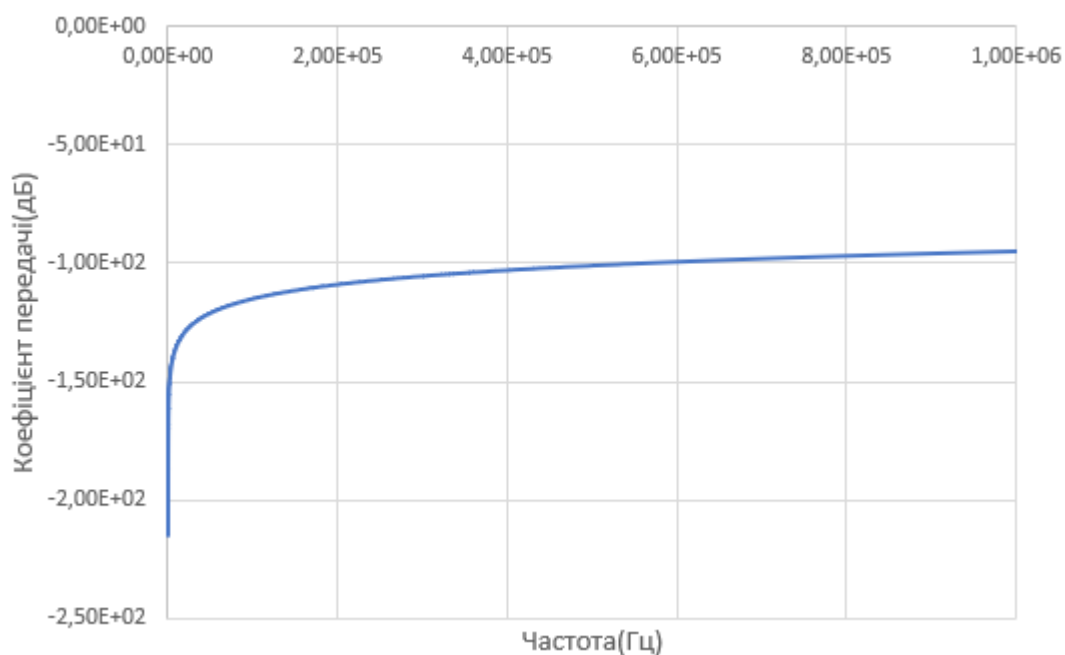


Рис. 4.7. Амплітудно-частотна характеристика схеми.

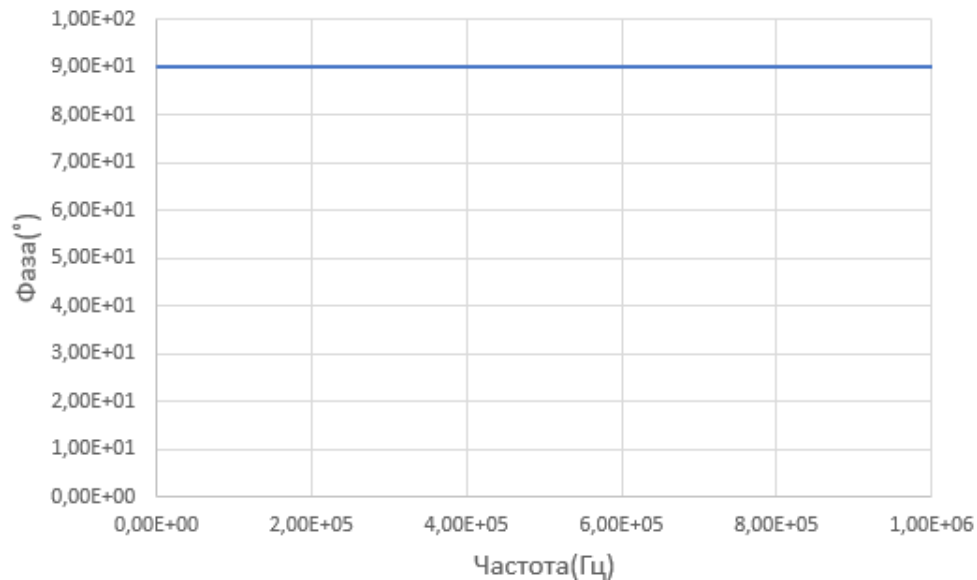


Рис. 3.8. Фазово-частотна характеристика схеми.

З рис. 4.7 видно, що сигнал зазнає меншого послаблення на частоті 500 кГц, це значення становить 100,714 дБ, а на 100 кГц – 114,577 дБ. Фазовий зсув становить  $90^\circ$  і не змінюється на всьому діапазоні частот.

Після цього було прийнято рішення, змінюючи частоту вхідного сигналу, виміряти залежності струму через комірку та зсуву фази між вихідною та вхідною напругами від величини опору  $R_1$ , а також оцінити рівень спотворень вихідного сигналу за значенням клір-фактору. При цьому було встановлено наступні параметри схеми: джерело сигналу – синусоїда амплітудою 10 В, внутрішній опір джерела: 1 мОм, ємність  $C_2$  (ємність розчину) – 4,78 пФ, ємність  $C_1$  (ємність датчика) – 2,95 пФ. Ємність  $C_1$  було зашунтовано ємністю  $C_3$ , що дорівнювала 2,95 нФ, для того щоб збільшити величину відгуку.

На рис. 4.9 зображено графіки залежностей струму через комірку від величини опору  $R_1$  при зміні частоти вхідного сигналу від 50 кГц до 1 МГц.

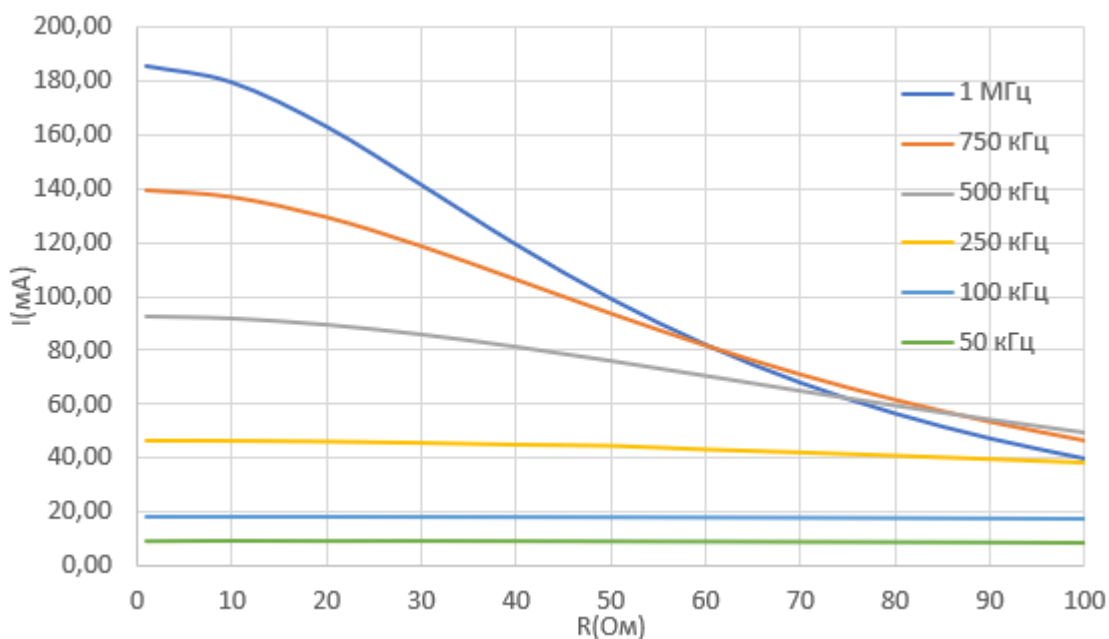


Рис. 4.9. Залежності струму через комірку від величини опору  $R_1$  при зміні частоти вхідного сигналу від 50 кГц до 1 МГц.

З графіків, наведених на рис. 4.9 видно, що струм через комірку при 50 кГц майже не змінюється. Натомість при 1 МГц даний струм змінюється найбільш інтенсивно. Даний факт, а також те, що найбільший коефіцієнт передачі спостерігається на частоті 1 МГц, спонукає працювати на високих частотах.

На рис. 4.10 зображено графіки залежностей зсуву фази між вихідною та вхідною напругами від величини опору  $R_1$  при зміні частоти вхідного сигналу від 50 кГц до 1 МГц.

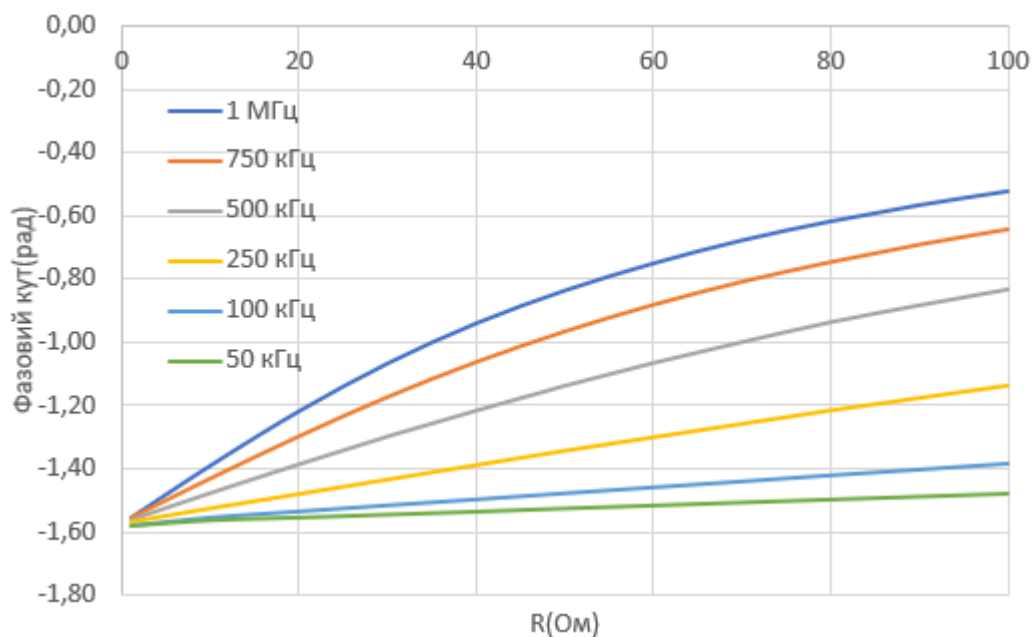


Рис. 4.10. Залежності зсуву фази між вихідною та вхідною напругами від величини опору  $R_1$  при зміні частоти вхідного сигналу від 50 кГц до 1 МГц.

З рис. 4.10 видно, що збільшення частоти джерела сигналу призводить до зменшення абсолютного значення зсуву фази між вхідною та вихідною напругою, особливо це помітно коли опір розчину більше 1 Ом. Так при опорі розчину 20 Ом, зсув фази на частоті 1 МГц становить -1,21 рад, а на частоті 50 кГц становить -1,55 рад і демонструє тенденцію до зростання. Отже, робота на високих частотах дозволяє зменшити інерційність схеми.

На рис. 4.11 зображено графіки залежностей клір фактору вихідного сигналу від величини опору  $R_1$  при зміні частоти вхідного сигналу від 50 кГц до 1 МГц.

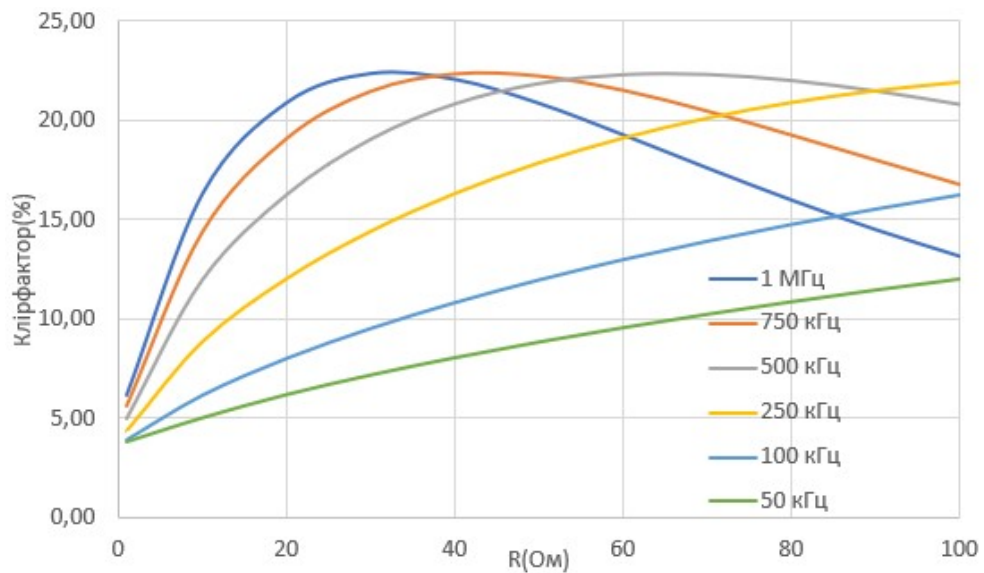


Рис. 4.11. Залежності клір фактору вихідного сигналу від величини опору  $R_1$  при зміні частоти вхідного сигналу від 50 кГц до 1 МГц.

З графіків на рис. 4.11 видно, що значення клір фактору зростає із збільшенням опору  $R_1$  до значення, на якому спостерігається його максимум, після чого клір фактор зменшується. Для частот 1 МГц, 750 кГц та 500 кГц дані значення опору  $R_1$  дорівнюють: 30, 60 та 70 Ом відповідно. Тому з міркувань зменшення ступеня спотворення вихідного сигналу є доцільним працювати на низьких частотах (порядку 50 кГц). Рішення працювати на високих частотах (порядку 1 МГц) є раціональним, у випадку коли розчин характеризується малим значенням опору  $R_1$ .

## РОЗДІЛ 5. ВИГОТОВЛЕННЯ КОНДУКТОМЕТРИЧНОГО ДАТЧИКА ЄМНІСНОГО ТИПУ

На початковому етапі виготовлення було прийнято рішення, що конструкція датчика являтиме собою два прямокутні паралелепіпеди, висотою 100 мм. Один із таких паралелепіпедів матиме основу 10x14 мм, а інший – 20x28 мм. Було вирішено, що виконана таким чином менша «трубка» буде розташована всередині більшої, а потім зверху на них буде поміщено шар скла. В якості основного матеріалу для виготовлення датчика було взято акрилове скло. На рис. 5.1 зображена розгортка датчика, виконана в програмному застосунку КОМПАС-3D.

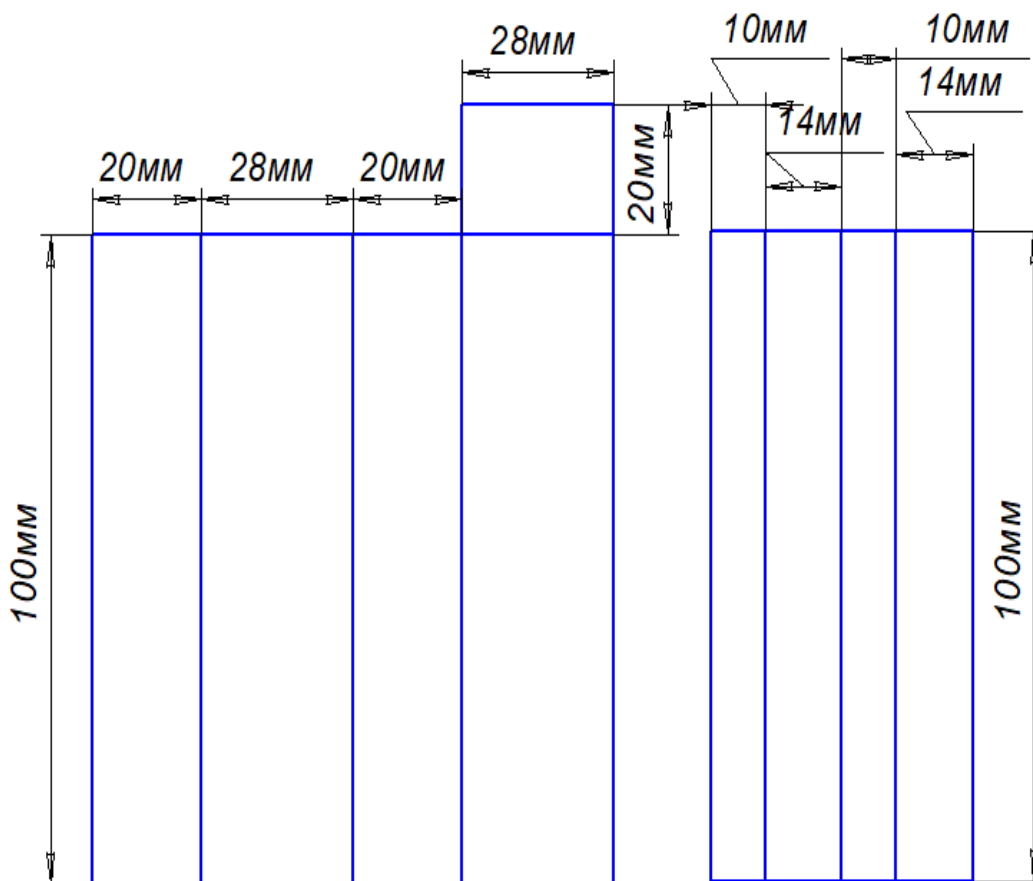


Рис.5.1. Розгортка датчика, виконана в програмному застосунку КОМПАС-3D.

На рис. 5.2 та 5.3 зображено 3D моделі складових частин датчика окремо, а на рис. 5.4 зображено його повну конструкцію.

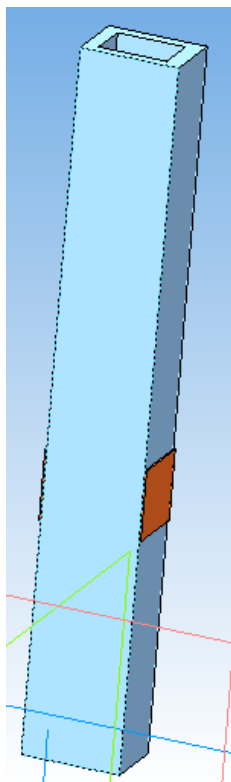


Рис. 5.2. Мала трубка, виконана в програмному застосунку КОМПАС-3D.

Тут помаранчевим кольором зображено обкладинки для утворення ємностей С1 та С2.

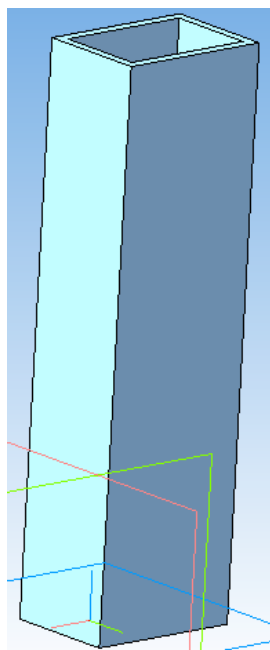


Рис. 5.3. Велика трубка, виконана в програмному застосунку КОМПАС-3D.

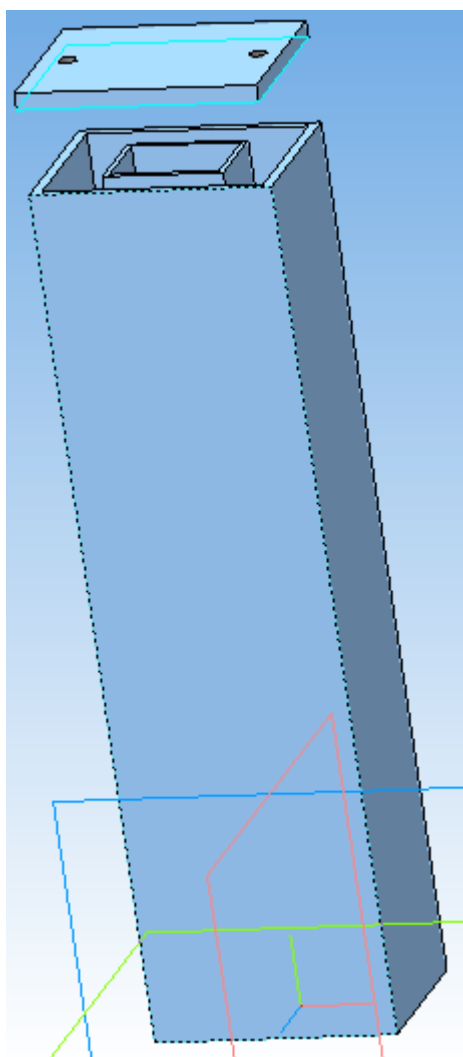


Рис. 5.4. Повна конструкція датчика, виконана в програмному застосунку КОМПАС-3D.

В даному випадку до конструкції було додано шар скла зверху та виконано в ньому отвори для під'єднання дротів.

На наступному етапі було нарізано акрилове скло із такими розмірами: 2 прямокутники 10x14 мм та два прямокутники 20x28 мм. Було вирішено використати профільну трубу та брусок в якості форми, для полегшення завдання склеювання складових частин датчика. На рис. 5.5 зображено профільну трубу та брусок, які було використано для виготовлення датчика.



Рис. 5.5. Брусок та профільна труба, які було використано для побудови датчика.

Брусок мав переріз 10x15 мм, а трубка 20x20 мм. Після цього для склеювання було використано ефір діетиловий. З його допомогою, а також із залишків «тирси», що утворилась під час різання акрилового скла, було виготовлено клейкий гель, який дозволив закріпити між собою складові частини датчика. Використання ефіру обумовлене тим, що акрилове скло важко клеїться звичними засобами, такими як клей «Момент», клей «Секунда» тощо.

На рис. 5.6 зображено шматки мідної фольги, зняті з анодованого гетинаксу розміром 10x10 мм, з яких було виготовлено обкладинки конденсаторів С1 та С2.

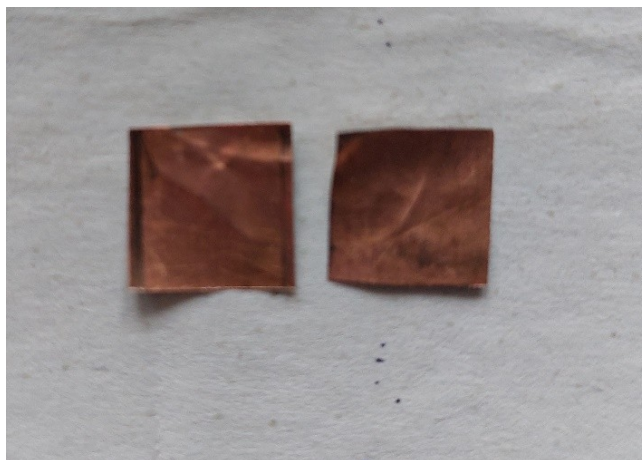


Рис. 5.6. Шматки мідної фольги, зняті з анодованого гетинаксу.

Дані шматки було залужено та приклеєно до малої трубки, а після цього до кожної з обкладинок припаяно дроти.

На завершальному етапі виготовлення, малу трубку було поміщено всередину великої, закрито зверху та знизу шаром акрилового скла з розмірами 27x25 мм, попередньо просвердливши в них отвори для дротів та отвір для потрапляння розчину всередину малої трубки. На рис. 5.7 зображено кінцевий вигляд датчика.

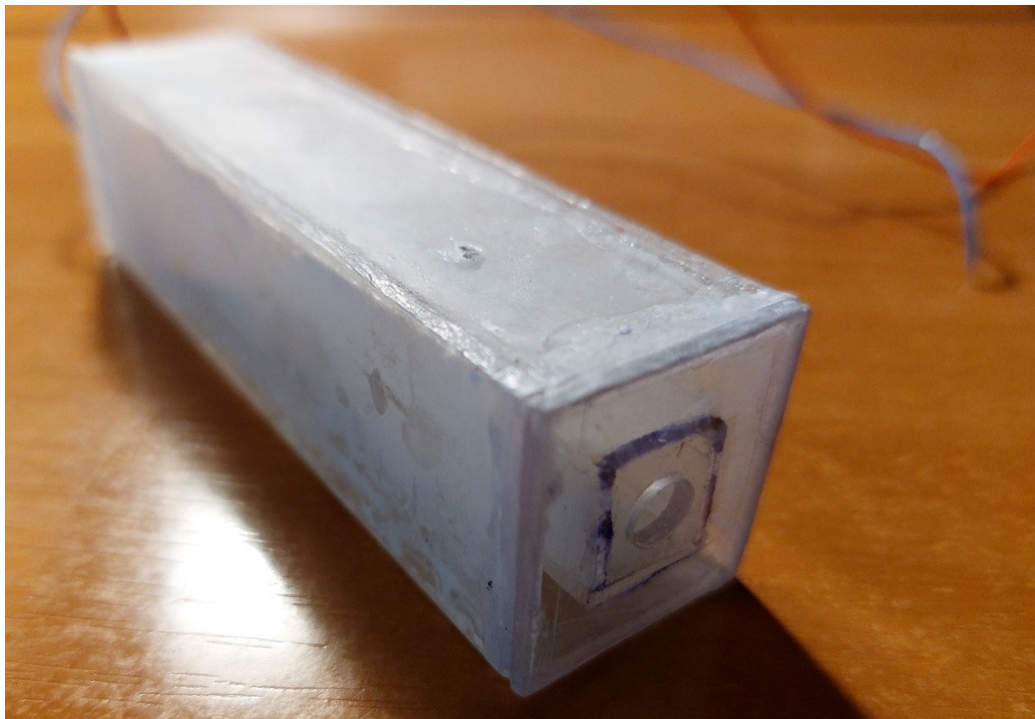


Рис. 5.7. Кінцевий вигляд датчика.

## РОЗДІЛ 6. КАЛІБРУВАННЯ КОНТАКТНИХ ДАТЧИКІВ TDS METER V1.0 ТА EC METER V1.0 ДЛЯ ARDUINO

Для того щоб набратись досвіду роботи з мікропроцесорними системами та вимірюванням електропровідності речовин, було вирішено використати контактний датчик концентрації TDS Meter V1.0 та контактний кондуктометр EC Meter V1.0 для плати мікроконтролера Arduino Uno. Датчик TDS методом кондуктометра (ЕС-метра) вимірює питому електричну провідність рідини, яка пропорційна сумарній кількості розчинених у воді домішок TDS (Total Dissolved Solids) на один мільйон частинок води (parts per million). Один ppm відповідає одному мг/літр. Діапазон вимірювання концентрації: 0 – 1000 ppm з точністю 10%. Датчик TDS Meter V1.0 зображено на рис. 6.1[12].



Рис. 6.1. Датчик TDS Meter V1.0. Загальний вигляд.

До складу TDS-датчика входить вимірювальний щуп та плата керування. Щуп сенсора виконаний у пластиковому герметичному циліндрі із двома електродами на кінці. При зануренні у вимірюваний розчин або воду між електродами починає протікати струм, який фіксує та обробляє плата керування. Плата керування генерує за допомогою мікросхеми CD4060BM

послідовність прямокутних імпульсів з амплітудою 3 В та частотою 40 кГц, які надходять на один із електродів щупа. При зануренні в рідину між електродами виникає струм, пропорційний електропровідності розчину. Далі сигнал підсилюється та випрямляється за допомогою операційних підсилювачів на мікросхемі LMV324. На виході сигнал проходить фільтрацію та потрапляє на вихід плати.

Спочатку було зібрано вимірювальну установку, структурна схема якої зображена на рис. 6.2, а її загальний вигляд – на рис. 6.3.

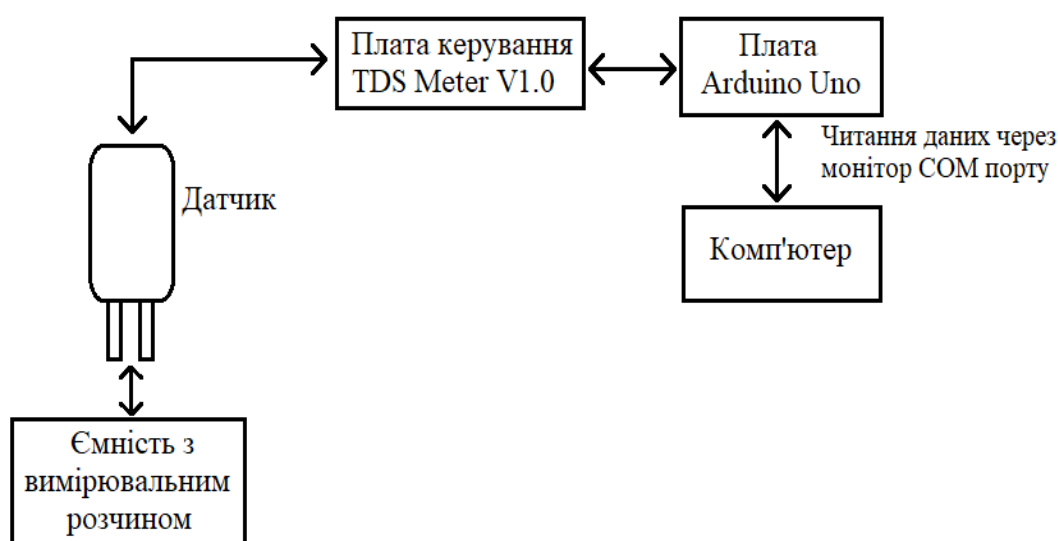


Рис. 6.2. Структурна схема установки для вимірювання концентрації розчину із використанням датчика TDS Meter V1.0.

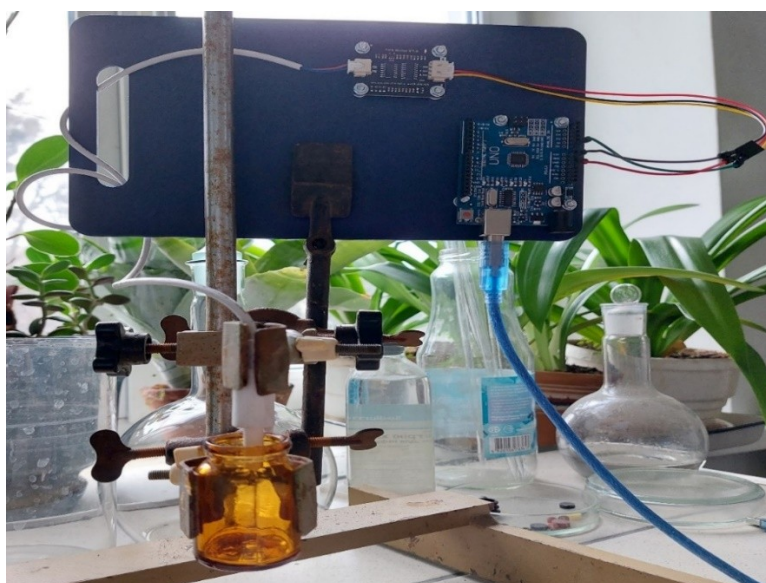


Рис. 6.3. Загальний вигляд установки для вимірювання концентрації розчину із використанням датчика TDS Meter V1.0.

Далі було вирішено провести калібрування датчика за допомогою розчину соди харчової у дистильованій воді з концентрацією 0,1 г / 100 мл (1000 ppm). Так було приготовано 3 розчини з концентрацією 1000 ppm. В ємності для вимірювання вміщалося 20 мл розчину. Отримані при вимірюванні дані подано в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1.

**Вимірювання концентрації розчину соди харчової**

Теоретичні дані, ppm	Експериментальні дані, ppm
1000	1107
1000	656,6
1000	462,17

З таблиці 6.1 видно, що для трьох однакових розчинів отримано різні значення концентрації. Тому було поставлено завдання перевірити правильність показів самого датчика. Для цього було приготовано 3 розчини з концентрацією 500 ppm, у кожен з яких датчик спочатку занурювався, фіксувалось значення концентрації, а далі було здійснено промивання датчика дистильованою водою і після цього проведено ще 2 вимірювання того самого розчину. Отримані дані подано в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2.

**Вимірювання концентрації розчину соди харчової**

Теоретичні дані, ppm		Експериментальні дані, ppm		
Розчин	Концентрація			
1	500	348	347	340
2	500	353,17	348	340,87
3	500	335,56	325	325

З таблиці 6.2 видно, що теоретичні та експериментальні дані все ще відрізняються. Але те, що для кожного із розчинів вдалось отримати 3 значення, які є близькими один до одного, свідчить про справність датчика.

Різницю між теоретичними та експериментальними даними можна пояснити наявністю систематичної похибки, яка пов'язана, наприклад, з

руйнуванням електродів датчика, появою на них плівки окислу або жиру. Систематичну похибку можна або усунути, або компенсувати. Одним з способів ліквідації похибки є очищення електродів за допомогою оцтової кислоти або знежирювальних засобів. В якості компенсації можна застосувати корекцію значень констант, формул тощо в програмному кодї плати Arduino, з використанням яких розраховується конкретне значення концентрації. Окрім цього до появи похибки може призвести неякісне приготування розчину. В подальшому для зважування соди були використані електронні терези, здатні вимірювати масу до другого знаку після коми, а для дистильованої води – медичний шприц ємністю 20 мл. Було висунуто припущення, що дистильована вода може мати ненульове значення концентрації розчинених речовин, і відповідно також вносити свою похибку в результат. Тому було виміряно концентрацію окремо для дистильованої води, це значення складало 0 ppm. Перед тим як здійснювати нові вимірювання, електроди датчика було очищено за допомогою засобу для знежирення. Отримані після цього дані подано в таблиці 6.3.

Таблиця 6.3.

**Вимірювання концентрації розчину соди харчової**

Теоретичні дані, ppm		Експериментальні дані, ppm		
Розчин	Концентрація			
1	800	388,1	376,99	380,68
2	800	351,58	348	351,58
3	900	499,98	508,67	526,36

З таблиці видно, що очищення електродів датчика від сторонніх речовин не призвело до наближення експериментальних даних в бік теоретичних.

Тому було поставлено завдання перевірити програмний код датчика на правильність використання констант та формул, через які реалізується розрахунок концентрації. Окрім цього, на веб-сторінці розробника датчика було знайдено програмний код, в якому при розрахунку концентрації відслідковується температура навколишнього середовища та використано

медіанну фільтрацію [6]. Було вирішено виміряти концентрацію кількох розчинів основною налагодженою програмою (1) та програмою, з сайту розробника (2). Отримані дані подано в таблиці 6.4.

Таблиця 6.4.

Теоретичні дані, ppm	Вимірювання концентрації розчину соди харчової	
	Експериментальні дані, ppm	
	Програма 1	Програма 2
1000	439,99	444
900	476,64	472
800	806,63	822

Як видно з таблиці 6.4 налагодження програмного коду датчика призвело до покращення узгодження експериментальних та теоретичних даних лише при 800 ppm. Було висунуто припущення, що харчова сода, яка використовувалась в попередніх дослідженнях, має в своєму складі домішки (наприклад, крейду). Тому було поставлено завдання провести нагрівання харчової соди при температурі близько 200° С протягом 5-6 хвилин. За таких умов домішки повинні вигоріти.

Після цього знову було проведено вимірювання концентрації розчину. Отримані дані подано в таблиці 6.5.

Таблиця 6.5.

Теоретичні дані, ppm	Вимірювання концентрації розчину соди харчової		
	Експериментальні дані, ppm		
800	803,4	765,39	762,51
700	506,49	499,98	499,98
600	1138,42	1151,84	1142,88
500	466,27	462,17	456,05
400	539,93	526,36	470,44
300	544,51	560,79	565,51
200	316,27	307,59	309,32

З таблиці 6.5 видно, що експериментальні та теоретичні дані найближчі один до одного лише при 800 та 500 ppm, для інших значень спостерігається

значна відмінність. Було висунуто припущення, що дані розчини було приготовано неякісно, через складність зважування малих кількостей соди (для прикладу для 800 ppm маса становила 80 мг, для 700 – 70 мг і т.д.) та відміряти потрібну кількість дистильованої води.

Було вирішено піти наступним шляхом: зважити колбу, в якій буде приготовано розчин, зважити потрібну кількість соди, засипати її в колбу та зважити соду та колбу. Далі долити дистильованої води, зважити весь розчин, відняти від цього значення масу колби з содою і таким чином визначити масу води. Далі розрахувати значення концентрації. За таким принципом було приготовано 7 розчинів і для них виміряно концентрації. Отримані дані подано в таблиці 6.6.

Таблиця 6.6.

**Вимірювання концентрації розчину соди харчової**

Теоретичні дані, ppm	Експериментальні дані, ppm		
796,55	756,39	771,77	778
591,42	753,35	762,58	762,51
490	499,98	480,83	478,73
382,4	412,66	424,26	424,26
288,93	316,27	312,79	314,53
184,128	273,27	266,47	264,77
95,32	158,91	162,4	160,66

Як видно з таблиці 6.6, узгодженість всіх точок, за винятком значення 591,42 ppm, між експериментальними та теоретичними даними було покращено.

На рис. 6.3 зображено графік залежності отриманих експериментальних даних від теоретичних.

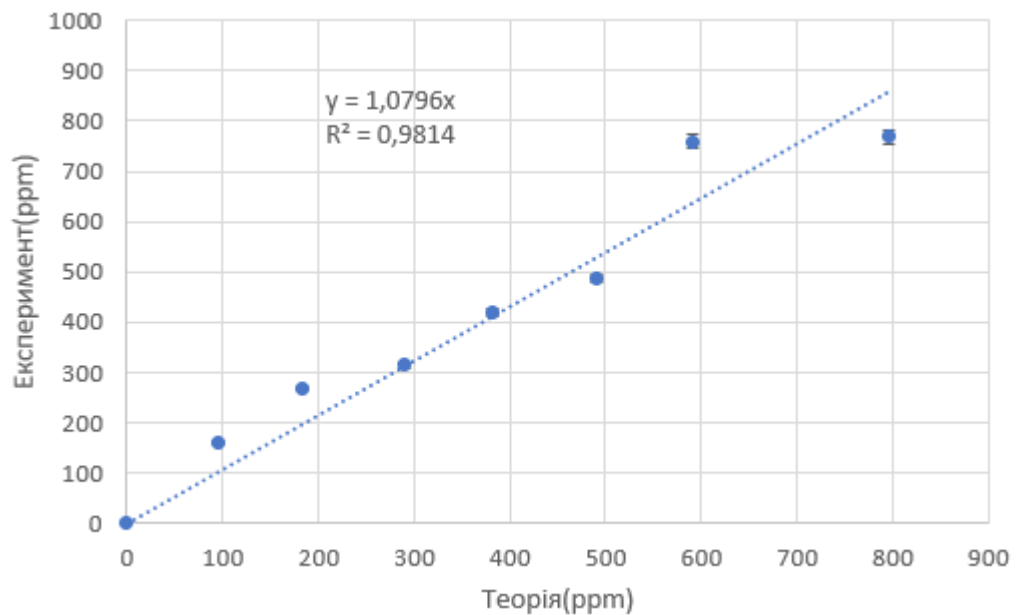


Рис. 6.4. Графік залежності експериментальних даних від теоретичних.

З графіку на рис. 6.4 було визначено похибку апроксимації відносно лінії тренду, яка дозволяє оцінити точність з якою було приготовано розчини:

$$(1 - R^2) * 100\% = (1 - 0,9814) * 100\% = 1,86 \%$$

Після цього було поставлено завдання провести калібрування контактного кондуктометра EC Meter V1.0. Плата керування даного датчика генерує послідовність прямокутних імпульсів з амплітудою 3 В та частотою 40 кГц, які надходять на електроди щупа. При зануренні у розчин, між електродами виникає напруга, яка надходить на вхід операційного підсилювача LMV324 в інверсному ввімкненні. Опір зворотного зв'язку даного підсилювача становить 820 Ом, вхідним опором є опір розчину, отже,

напруга на виході даного каскаду визначається виразом:  $U_{\text{вих}} = - \frac{R_{33}}{R_1} U_{\text{вх}}$ . Далі

сигнал надходить на вхід схеми обчислення модуля і потрапляє на аналоговий вхід плати Arduino. Діапазон вимірювання електропровідності: 1 – 20 мСм/см з точністю 10%. Зовнішній вигляд датчика EC Meter V1.0 зображено на рис. 6.5 [13], а на рис. 6.6 – вимірювальна установка.



Рис. 6.5. Контактний кондуктометричний датчик EC meter V1.0 [13].



Рис. 6.6. Загальний вигляд установки для вимірювання електропровідності розчину із використанням датчика EC Meter V1.0.

Далі було приготовано розчини соди харчової в дистильованій воді, виміряно їх електропровідність датчиком EC Meter V1.0, а також концентрацію соди за допомогою датчика TDS Meter V1.0. Вимірювання було здійснено в межах від 600 до 1000 ppm. Це обумовлено тим, що при концентраціях, менших за 600 ppm, не вистачало чутливості кондуктометра EC Meter V1.0, а при концентраціях більших за 1000 ppm – датчик

концентрації TDS Meter V1.0 виходив в насичення. Отримані дані подано в таблиці 6.7.

Таблиця 6.7.

**Вимірювання електропровідності розчину соди харчової**

Концентрація, ppm			Електропровідність, мСм/см		
599,46	629,89	632,49	1	1,04	1,04
635,09	632,49	629,89	1,2	1,17	1,14
640,32	675,28	664,35	1,2	1,2	1,04
653,58	667,07	669,79	1,07	1,1	1,14
697,61	664,35	669,79	1,14	1,2	1,17
689,16	691,97	686,36	1,27	1,2	1,17
700,45	697,61	691,97	1,27	1,2	1,22
711,91	709,03	700,45	1,17	1,31	1,17
778	697,61	726,46	1,31	1,27	1,27
732,36	771,77	765,58	1,2	1,17	1,31
771,77	768,67	771,77	1,34	1,37	1,2
800,48	806,63	809,87	1,44	1,34	1,31
846	826,25	813,12	1,41	1,34	1,34
849,7	839,57	836,22	1,34	1,54	1,47
870,28	887,8	849,46	1,54	1,51	1,61
873,76	877,25	877,25	1,41	1,51	1,41
853,1	898,46	909,24	1,64	1,51	1,64
912,86	887,8	880,75	1,57	1,54	1,54
891,34	894,89	902,04	1,61	1,54	1,37
920,14	923,81	927,48	1,54	1,64	1,51
927,48	946,06	949,82	1,67	1,77	1,64
976,51	964,98	968,81	1,67	1,51	1,55
949,82	984,26	992,07	1,77	1,77	1,81
1007,87	976,51	972,65	1,71	1,71	1,77
1060,83	1036,07	1032	2,07	1,94	1,94

На рис. 6.7 зображено графік залежності електропровідності розчину від концентрації розчиненої речовини.

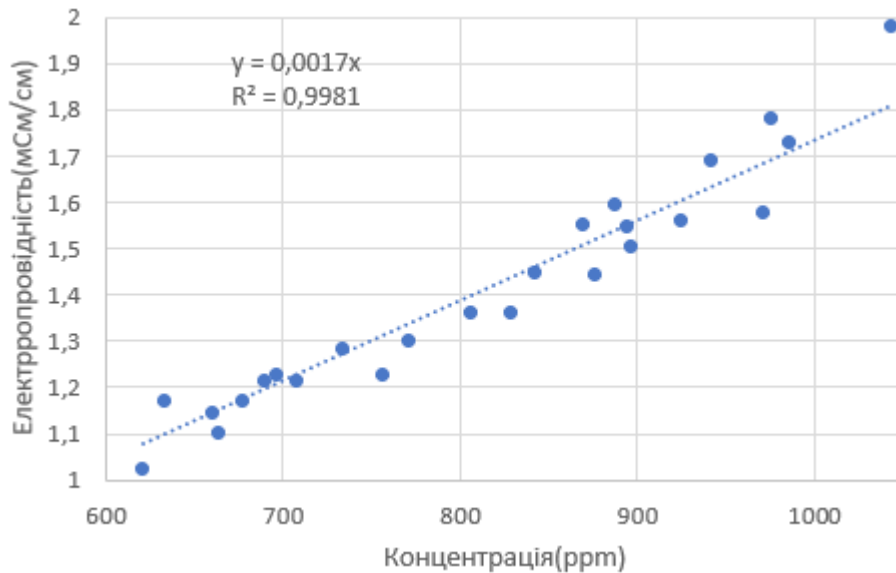


Рис. 6.7. Графік залежності електропровідності від концентрації розчину соди харчової в дистильованій воді.

З графіку на рис. 6.7 було визначено похибку апроксимації:

$$(1 - R^2) * 100\% = (1 - 0,9981) * 100\% = 0,19 \%$$

Після цього було вирішено підібрати солі, які добре розчиняються, та провести для них вимірювання електропровідності при різних значеннях концентрації розчину. Список солей, які було обрано для дослідження, подано в таблиці 6.8.

Таблиця 6.8.

**Солі, які добре розчиняються у воді**

Назва	Хімічна формула	Розчинність
Калій вуглекислий	$K_2CO_3$	110,5 г / 100 мл
Натрій вуглекислий	$Na_2CO_3$	21,8 г / 100 мл
Калій йодид	KI	148 г / 100 мл

Далі було приготовано 7 розчинів для кожної солі та виміряно їх електропровідність датчиком EC Meter V1.0, а концентрацію – датчиком TDS Meter V1.0. Отримані дані подано в таблицях 6.9, 6.10 та 6.11.

Таблиця 6.9.

**Вимірювання електропровідності розчину калію вуглекислого**

Концентрація, ppm	Електропровідність, мСм/см
-------------------	----------------------------

592,05	582,28	570,26	1,04	1	1,1
656,25	650,91	653,58	1,24	1,27	1,2
723,53	703,3	709,03	1,37	1,41	1,41
839,57	839,57	846,31	1,47	1,47	1,51
887,8	891,34	894,89	1,54	1,67	1,57
942,32	938,59	949,82	1,71	1,84	1,74
1007,85	999,94	996	1,84	1,94	1,94

Таблиця 6.10.

**Вимірювання електропровідності розчину натрію вуглекислого**

Концентрація, ppm			Електропровідність, мСм/см		
560,79	563,15	558,44	1,07	1,04	1,04
594,51	592,05	599,46	1,17	1,1	1,2
729,41	729,41	735,32	1,24	1,34	1,34
803,4	816,38	800,18	1,47	1,51	1,37
846,31	842,93	839,57	1,54	1,51	1,47
902,04	905,63	902,24	1,61	1,57	1,64
968,81	980,38	984,26	1,81	1,84	1,77

Таблиця 6.11.

**Вимірювання електропровідності розчину йодиду калію**

Концентрація, ppm			Електропровідність, мСм/см		
619,61	646,6	640,32	1,1	1,2	1,07
709,03	706,16	703,3	1,27	1,37	1,31
781,14	759,44	778	1,44	1,37	1,27
891,34	880,75	873,76	1,54	1,41	1,47
934,87	920,14	912,86	1,61	1,84	1,77
957,37	953,59	964,98	2,04	2,11	1,91
999,94	996	1003,9	2,47	2,34	2,31

На рис. 6.8, 6.9, 6.10 зображено графіки залежності електропровідності розчинів калію вуглекислого, натрію вуглекислого та йодиду калію від концентрації розчиненої речовини.

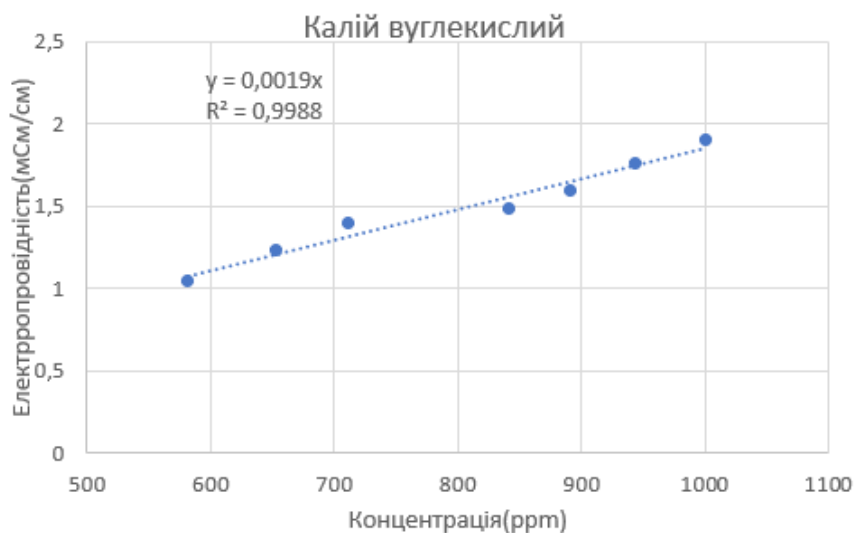


Рис. 6.8. Графік залежності електропровідності від концентрації розчину калію вуглекислого в дистильованій воді.

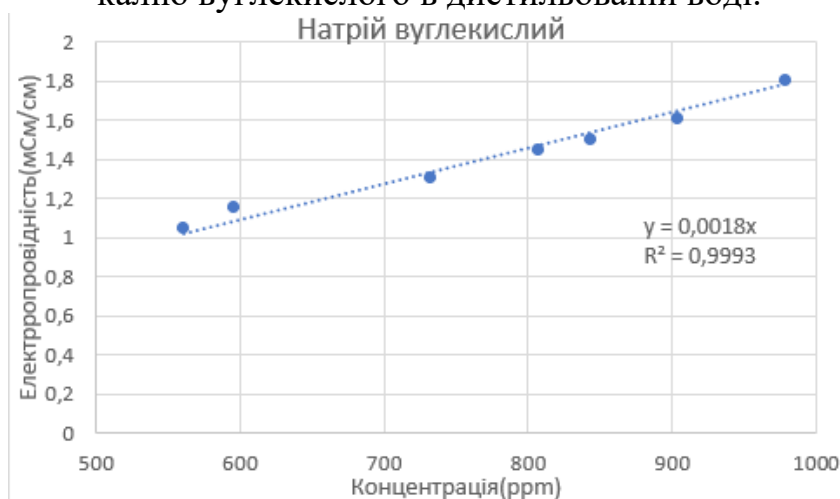


Рис. 6.9. Графік залежності електропровідності від концентрації розчину натрію вуглекислого в дистильованій воді.

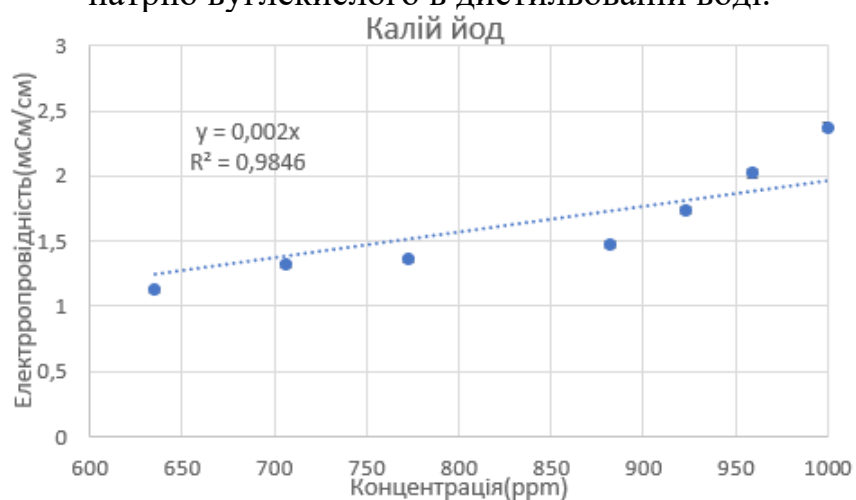


Рис. 6.10. Графік залежності електропровідності від концентрації розчину йодиду калію в дистильованій воді.

При збільшенні концентрації солі, збільшується кількість розчинених у воді іонів, а значить електропровідність розчину також зростає, що видно з графіків на рис. 6.8, 6.9, 6.10. В цьому випадку конкретні значення величини похибки апроксимації дорівнювали: 0,12%, 0,07% та 1,54% для калію вуглекислого, натрію вуглекислого та йодиду калію відповідно.

## РОЗДІЛ 7. ДОСЛІДЖЕННЯ ОРИГІНАЛЬНОГО КОНДУКТОМЕТРИЧНОГО ДАТЧИКА ЄМНІСНОГО ТИПУ

Перед початком дослідження було поставлено завдання зібрати схему вимірювання, яка б дозволила виміряти струм через розчин при зануренні в нього датчика. В якості джерела вхідного сигналу було обрано генератор сигналів ГЗ-112/1. Окрім цього, було прийнято рішення використати резистор з низьким опором, і вимірявши на ньому напругу за допомогою осцилографа, розрахувати струм, що протікає через комірку. Щоб збільшити значення вихідного сигналу, паралельно з коміркою було встановлено ємнісний шунт, значення якого було в 1000 разів більше за ємність  $C_1$  (ємність датчика). Для зменшення впливу завад було вирішено використати USB дріт для передачі сигналу з датчика на схему, що включає в себе ємнісний шунт, а також вимірювальний резистор  $R$ , через який буде розраховуватись струм. Сигнал з виходу осцилографа виводився на екран комп'ютера. На рис. 7.1 зображено функціональну схему вимірювання струму через комірку при її занурюванні в розчин, а на рис. 7.2 – загальний вигляд вимірювальної установки.

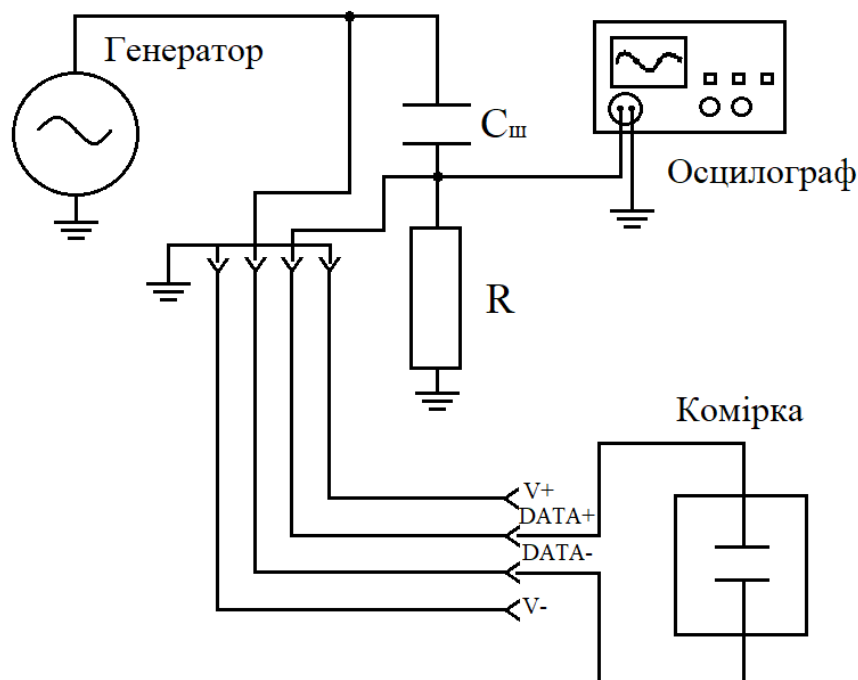


Рис. 7.1. Функціональна схема вимірювання струму через комірку при занурюванні в розчин.

В даній схемі ємність шунта було обрано рівною 3,3 нФ, а опір вимірювального резистора – 0,58 Ом.

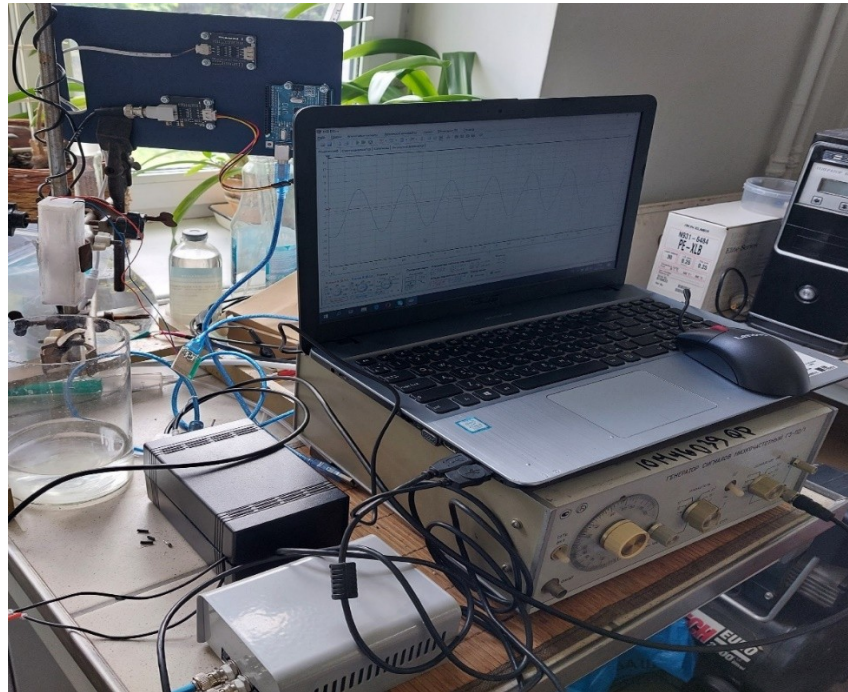


Рис. 7.2. Загальний вигляд схеми вимірювання струму через комірку при занурюванні в розчин.

Під час підготовки до вимірювання було виявлено, що смуга пропускання наявного осцилографа є достатньою для вимірювання сигналів лише на частотах до 200 кГц. Окрім цього на частотах порядку 1 МГц відбувається зменшення амплітуди вихідної напруги з потрібних 10 В до рівня близько 3 В. Тому було прийнято рішення почати роботу з синусоїдальних сигналів частотою 50 кГц та амплітудою 10 В.

На наступному кроці було приготовано розчини соди харчової в дистильованій воді. За допомогою контактного датчика EC Meter V1.0 спочатку було виміряно електропровідність, після занурення власного датчика в розчин, фіксувалась амплітуда та фаза вихідного сигналу осцилографа і розраховувався струм. Отримані дані подано в таблиці 7.1. На рис. 7.3 зображено залежність струму через комірку від питомого опору

розчину, а на рис. 7.4 – залежність зсуву фаз між вхідним та вихідним сигналом від питомого опору розчину.

Таблиця 7.1

**Дослідження розчину соди харчової в дистильованій воді**

Електропровідність, мСм/см	Струм (А)	Зсув фаз(°)
1,036	0,327	-9,424
1,306	0,344	-9,424
1,34	0,3275	-84,823
1,396	0,3275	-119,38
1,43	0,3103	-81,6814
1,603	0,3275	-163,362

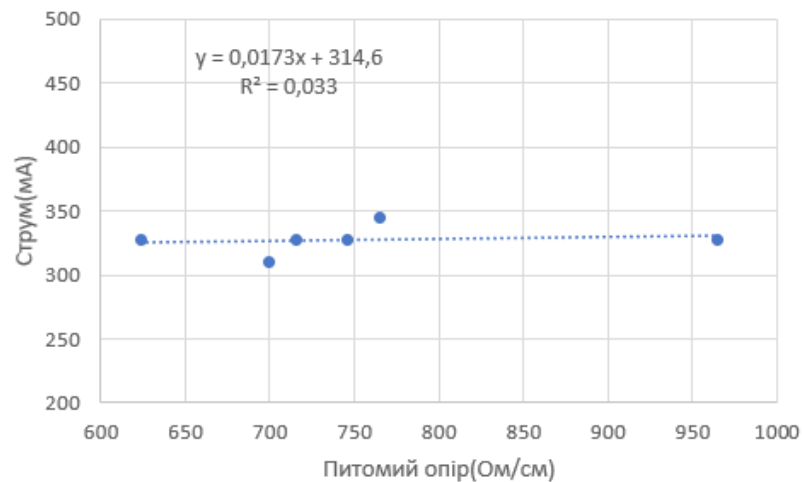


Рис. 7.3. Залежність струму через комірку від питомого опору розчину.

З графіку на рис. 7.3 видно, що струм через комірку майже не змінюється при зростанні значення питомого опору розчину.

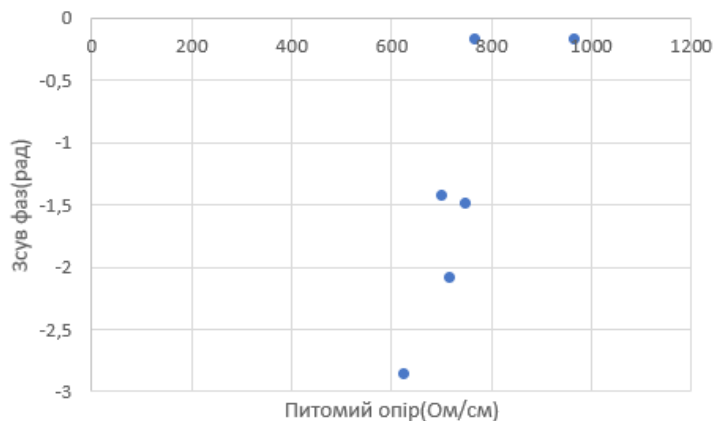


Рис. 7.4. Залежність зсуву фаз між вхідним та вихідним сигналом від питомого опору розчину.

Як видно з рис. 7.4, абсолютне значення зсуву фази зменшується при збільшенні питомого опору розчину, так при 623 Ом/см модуль зсуву фази дорівнює 2,85 рад, після чого відбувається його різкий спад до рівня 0,16 рад при 765 Ом/см. Далі зсув фази залишається постійним.

Отримані експериментальні залежності на якісному рівні повністю узгоджуються із результатами комп'ютерного моделювання роботи еквівалентної схеми датчика, наведеними в розділі 4. При частоті вхідного сигналу 50 кГц струм через комірку з ростом опору комірки практично не змінюється, а зсув фази між вихідною та вхідною напругами демонструє тенденцію до зменшення за абсолютним значенням.

Однією з причин кількісних відмінностей між результатами експерименту та комп'ютерного моделювання може бути неправильно обране значення опору вимірювального резистора  $R$ , адже його номінал слід обирати з міркувань очікуваної величини опору розчину. Окрім цього, монтаж елементів, роз'ємів USB, BNC для передачі сигналу з генератора до комірки і від комірки на вимірювальний опір виконано на макетній платі для паяння, з'єднання подекуди реалізовувалось доріжками припою та порівняно довгими дротами, які в свою чергу можуть працювати як антена. В результаті така конструкція є вразливою до впливу наведень та завад із зовнішнього середовища. Отже, схема вимірювання вимагає подальшого вдосконалення та якіснішої реалізації.

## ВИСНОВКИ

1. Комп'ютерне моделювання роботи еквівалентної схеми оригінального кондуктометричного датчика для вимірювання електропровідності Z-метричним методом, що відповідає розчинам, які добре проводять електричний струм показало, що:
  - збільшення частоти вхідного сигналу призводить як до збільшення величини струму через комірку, так і до розширення діапазону зміни струму при зміні опору комірки;
  - збільшення частоти вхідного сигналу призводить до зменшення фазового зсуву між вхідною та вихідною напругами, особливо це помітно коли опір комірки більше 1 Ом;
  - при збільшенні частоти вхідного сигналу зростає значення клір-фактору вихідного сигналу; залежність клір-фактору від опору комірки носить екстремальний характер із явно вираженим максимумом.

Отже частоту вхідного сигналу слід обирати не лише з міркувань рівня вихідного сигналу, а й спиратись на рівень його нелінійних спотворень.

2. Калібрування фабричних датчиків TDS Meter V1.0 та EC meter V1.0 для плати мікроконтролера Arduino Uno дозволило отримати похибки апроксимації на рівні 1,86 % та 0,19% відповідно. В результаті проведених досліджень із такими солями як: калій вуглекислий, натрій вуглекислий та калій було отримано похибки апроксимації електропровідності на рівні: 0,12%, 0,07% та 1,54% відповідно. Ґрунтуючись на цих даних, можна говорити, що розчини були приготовані з високою точністю.
3. Отримані під час дослідження оригінального кондуктометричного датчика емнісного типу експериментальні залежності на якісному рівні повністю узгоджуються із результатами комп'ютерного моделювання роботи еквівалентної схеми датчика.
4. Однією з причин кількісних відмінностей між результатами експерименту та комп'ютерного моделювання може бути неправильно обране значення опору вимірювального резистора R. Окрім цього, конструкція використаної в роботі вимірювальної установки є вразливою до впливу наведень та завод із зовнішнього середовища. Вона вимагає подальшого вдосконалення та якіснішої реалізації.

## ПОДЯКА

За сприяння і допомогу у підготовці та проведенні досліджень дякую доценту кафедри радіотехніки та радіоелектронних систем факультету радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем КНУ імені Тараса Шевченка, д.т.н. Ольшевському С.В., а також співробітникам лабораторії аналітичної хімії та моніторингу токсичних речовин Державної установи «Інститут медицини праці імені Ю.І. Кундієва Академії медичних наук України».

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Тулупов В.В. Методи та засоби захисту інформації. Текст лекції із дисципліни для студентів за напрямом підготовки 6.170102 "Системи технічного захисту інформації". Харківський національний університет внутрішніх справ, 2016.
2. Г.І. Ластівка, П.М. Шпатар. Технічний захист інформації в інформаційних та телекомунікаційних системах: Навчальний посібник / укл. Чернівці: Чернівецький національний університет, 2018. 252 с.
3. Баранов А.П. Чи можна захистити в «хмарі» конфіденційну інформацію? А. Баранов // Системи високої доступності. — 2012. — Т. 8. — № 2. — С. 12-15.
4. Антонюк А.О. Основи захисту інформації в автоматизованих системах— К.: КМ Академія, 2006. 244 с.
5. Аналітична хімія. URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Аналітична\\_хімія](https://uk.wikipedia.org/wiki/Аналітична_хімія) (дата звернення 02.05.2023).
6. Циганок Л.П., Бубель Т.О., Вишнікін А.Б., Вашкевич О.Ю. Аналітична хімія. Хімічні методи аналізу: навчальний посібник; за ред. проф. Л.П. Циганок - Дніпропетровськ: ДНУ ім. О. Гончара, 2014. 252 с.
7. M. Shrestha, C. Johansen, J. Noll, and D. Roverso, "A Methodology for Security Classification applied to Smart Grid Infrastructures," Int. J. Crit. Infrastruct. Prot., vol. 28, p.
8. Смик Н.І. Сучасні електрохімічні методи аналізу. Основні поняття електрохімії. Навчально-методичний посібник.— Київ., 2020. 45с.
9. Застосування кондуктометричних методів аналізу. URL: <https://studfile.net/preview/2465228/page:6/> (дата звернення 02.05.2022).
10. Бабаш А.В., Гольєв Ю.І., Ларін Д.А., Шанкін Г.П. Про розвиток криптографії в ХІХ столітті // Захист інформації. Конфідент. — 2003. — №5 — с. 90-96.
11. Конахович Г.Ф., Климчук В.П., Паук С.М., Потапов В.Г., Чуприн В.М., Горбунов О.О. Захист інформації в телекомунікаційних системах: Навчальний посібник. (лист МОНУ №1.4/18 – Г – 183 від 02.06.2009р.). – К.: НАУ, 2009. 380с.
12. KS0429 keyestudio TDS Meter V1.0. URL: [https://wiki.keyestudio.com/KS0429\\_keyestudio\\_TDS\\_Meter\\_V1.0](https://wiki.keyestudio.com/KS0429_keyestudio_TDS_Meter_V1.0) (дата звернення 02.05.2023).
13. Analog EC Meter V1.0. URL: [https://wiki.dfrobot.com/Analog\\_EC\\_Meter\\_SKU\\_DFR0300](https://wiki.dfrobot.com/Analog_EC_Meter_SKU_DFR0300) (дата звернення 02.05.2023).