

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УЖГОРОДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Інженерно-технічний факультет
Кафедра приладобудування

ДО ЗАХИСТУ ДОПУЩЕНО

Завідувач кафедри

доц. Чичура І.І.

“ ” 2024р.

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної магістерської роботи

на тему:

ІОНОМІР ЛАБОРАТОРНИЙ АВТОМАТИЗОВАНИЙ

Виконав:

Савла А.В.

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник:

доц. Овчаренко В.В.

(вчене звання, ПІБ, посада)

(підпис)

Ужгород 2024

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної магістерської роботи: 74 с., 3 табл., 18 рис., 12 джерел.

ПОТЕНЦІОМЕТРИЯ, ЕЛЕКТРОЛІТИ, АВТОМАТИЗОВАНИЙ АНАЛІЗАТОР ЕЛЕКТРОЛІТІВ.

Об'єкт дослідження — пристрій вимірювання концентрації іонів K^+ , Ca^{++} , Na^+ , Li^+ в рідинах.

Мета роботи — розробка автоматизованого лабораторного іономіру. Проект включає огляд принципу роботи потенціометричних датчиків вимірювання, огляд сучасних систем вимірювання концентрації іонів, розробка блоку живлення та розрахунок вихідних характеристик; вибір та обґрунтування структурної та принципової схем

Методи дослідження — аналіз принципів побудови іоно-селективних датчиків та підходів до автоматизації процесу вимірювання, синтез структури та електричних схем автоматизованого приладу.

У результаті виконання роботи було розглянуто методи калібрування електродів, розроблена схема електрична принципова блоку обробки та блоку живлення, розглянуто автоматизацію процесу вимірювання та калібрування, розроблено програмне забезпечення пристрою.

Кінцевий результат проекту може бути використаний в навчальних цілях та для розробки більш функціональних та складних проектів.

ABSTRACT

Explanatory note to the qualification master's thesis: 74 p., 3 tables, 18 figures, 12 sources.

POTENTIOMETRIC, ELECTROLYTES, AUTOMATED ELECTROLYTE ANALYZER.

The object of the study is a device for measuring the concentration of K^+ , Ca^+ , Na^+ , Li^+ ions in liquids.

The purpose of the work is to develop an automated laboratory ionometer. The project includes a review of the principle of operation of potentiometric measurement sensors, a review of modern ion concentration measurement systems, development of a power supply and calculation of output characteristics; selection and justification of structural and schematic diagrams

Research methods are an analysis of the principles of constructing ion-selective sensors and approaches to automating the measurement process, synthesis of the structure and electrical circuits of an automated device.

As a result of the work, electrode calibration methods were considered, an electrical schematic diagram of the processing unit and power supply unit was developed, automation of the measurement and calibration process was considered, and the device software was developed.

The final result of the project can be used for educational purposes and for the development of more functional and complex projects.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ.....	9
2 АНАЛІЗ ПРИНЦИПІВ РОБОТИ ПОТЕНЦІОМЕТРИЧНИХ ДАТЧИКІВ В РІДИНАХ.....	10
2.1 Основи потенціометрії.....	10
2.2 Принцип роботи потенціометричних датчиків.....	15
3 ОГЛЯД СУЧАСНИХ СИСТЕМ ВИМІРЮВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ІОНІВ В РІДИНАХ.....	22
3.1 Основні принципи сучасних систем вимірювання концентрації іонів.....	22
3.2 Види систем вимірювання концентрації іонів.....	26
3.3 Новітні системи у вимірюванні концентрації іонів.....	30
4 МЕТОДИКА КАЛІБРУВАННЯ.....	34
4.1 Опис техніки калібрування електрода та визначення точності вимірювань.....	34
4.2 Калібрування приладу за двома точками.....	36
4.3 Калібрування приладу за однією точкою.....	40
5 БЛОК КЕРУВАННЯ ТА ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ.....	41
5.1 Вибір мікроконтролера.....	41
5.2 Розробка програмного забезпечення.....	43
5.3 Вибір графічного дисплею.....	51
5 БЛОК ЖИВЛЕННЯ.....	55
7.1 Принцип побудови імпульсного блоку живлення.....	55
7.2 Розрахунок трансформатора.....	56
7.3 Вибір мікросхеми.....	66

					КМР.АКІТ.19050032. 01.000 ПЗ					
Зм.	Арк	№ докум	Підпис	Дата						
розробив	Савла А.В.				Іономір лабораторний автоматизований			Літера	Аркуш	Аркушівв
Перевірів	Овчаренко В. В							у	6	74
Н. Контр.								УжНУ, ІТФ 6 курс гр. АКІТ		
Затв.	Чичура І.І.									

6 ОПИС РОБОТИ ПРИЛАДУ.....	68
ВИСНОВКИ.....	71
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	72
ДОДАТКИ.....	73

ВСТУП

Іономіри є важливими приладами в сучасній науковій та промисловій діяльності, забезпечуючи точні вимірювання концентрацій іонів у різних середовищах. Ці прилади широко застосовуються в таких галузях, як медицина, хімія, біологія, екологія та харчова промисловість, де контроль іонного складу рідин відіграє ключову роль. Іони, такі як натрій, калій, кальцій, літій та інші, мають значний вплив на фізіологічні процеси в живих організмах, а також є критичними для виробничих процесів у таких сферах, як обробка води, виробництво фармацевтичної продукції та контроль якості харчових продуктів.

Застосування іономірів дозволяє точно вимірювати активність та концентрацію іонів, що має велике значення для забезпечення якості, безпеки та ефективності в багатьох галузях. Раніше визначення іонного складу потребувало ручних методів і могло бути обмежене за точністю та повторюваністю результатів. Завдяки розвитку технологій іономіри сьогодні здатні надавати точні та швидкі результати, що мінімізує людський фактор і забезпечує високу надійність даних.

Метою магістерської роботи є дослідження принципів роботи іономірів, розробка методології вимірювання концентрацій іонів та впровадження підходів для підвищення точності і надійності отримуваних результатів у дослідженнях та виробничих умовах.

1 ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ

В роботі передбачено розробку приладу для визначення концентрації K^+ , Na^+ , Ca^{++} та Li^+ в рідинах з використанням потенціометричного методу. Для досягнення цієї мети важливо встановити технічні вимоги до приладу, які гарантуватимуть його надійність, точність та стабільність вимірювань. У даному розділі будуть розглянуті основні технічні вимоги до приладу.

Ці вимоги відіграють важливу роль у розробці приладу, оскільки забезпечують правильну роботу пристрою в широкому діапазоні умов та гарантують достовірність та точність вимірювань концентрації K^+ та Na^+ . Далі будуть детально розглянуті кожна з цих технічних вимог для належного розуміння і врахування при проектуванні та розробці приладу.

1. Вимірювання: Іони - K^+ , Na^+ , Ca^{++} , Li^+ .
2. Атмосферний тиск: від 720 до 780 мм.рт.ст.
3. Вологість повітря: до 80%.
4. Основна допустима похибка вимірювання: K^+ : $\pm 0,2$ ммоль/дм³. Na^+ : ± 2 ммоль/дм³.
5. Живлення: Постійне живлення від мережі 220 В, 50 ± 1 Гц.
6. Споживана потужність: Не більше 10 ВА.
7. Час встановлення показів: Не більше 1 хвилини. Основний керуючий пристрій: Мікроконтролер.
8. Відображення показів та режимів роботи: Дисплей
9. Передача даних: Безпроводна
10. Температура навколишнього середовища: від $+10$ °C до $+35$ °C.
11. Габарити і маса: Мінімальні.

					КМР.АКІТ.19050032. 01.000 ПЗ	Арк
Зм.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		9

2 АНАЛІЗ ПРИНЦИПІВ РОБОТИ ПОТЕНЦІОМЕТРИЧНИХ ДАТЧИКІВ ВИМІРЮВАННЯ ІОНІВ В РІДИНАХ

2.1. Основи потенціометрії

Потенціометричний метод аналізу оснований на вимірюванні потенціалу індикаторного електрода, величина якого залежить від складу досліджуваного розчину, в який він опущений.

Потенціометрія, як метод фізико-хімічного аналізу, має два види:

1) **Пряма потенціометрія** – метод аналізу, що оснований на визначенні активності (концентрацій) досліджуваних компонентів безпосередньо по величині потенціалу індикаторного електрода або по величині ЕРС.

Пряма потенціометрія основана на рівнянні Нернста. Рівняння Нернста дає просте співвідношення між потенціалом індикаторного електрода та концентрацією (активністю) визначуваного іона в розчині. Тому, на основі вимірювання величини потенціалу індикаторного електрода можна розрахувати активність (концентрацію) досліджуваного іона в розчині:

$$E_x = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln[M^{n+}] \quad - \text{коли вимірюють концентрацію катіона};$$

$$E_x = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln[An^{n-}] \quad - \text{коли вимірюють концентрацію аніона}.$$

де E_x – реальний електродний потенціал індикаторного електрода у досліджуваному розчині;

E^0 - стандартний електродний потенціал, що вимірюється у вольтах;

R - універсальна газова стала, що дорівнює 8,314 Дж/(моль·К);

T - температура розчину в °К;

F - число Фарадея, що дорівнює 96500 Кл/г-екв.;

n - кількість електронів, які беруть участь в електрохімічному процесі;

Зм.	Арк	№ докум	Підпис	Дата

$[M^{n+}]$ – концентрація катіону у досліджуваному розчині;

$[An^{n-}]$ - концентрація аніону у досліджуваному розчині.

Якщо у формулу Нернста підставити числові значення констант R та F і перейти від натуральних логарифмів до десяткових, то при $T=298^\circ K$ отримаємо

$$E_x = E^0 + \frac{0,059}{n} \lg[M^{n+}] \quad - \text{коли вимірюють концентрацію катіона};$$

$$E_x = E^0 - \frac{0,059}{n} \lg[An^{n-}] \quad - \text{коли вимірюють концентрацію аніона}.$$

Звідси отримуємо, наприклад, що $\lg[M^{n+}] = \frac{n(E_x - E^0)}{0,059}$

Як індикаторні електроди в прямій потенціометрії використовують і електроннообмінні, та іонообмінні електроди.

Явище виникнення поверхневого електродного потенціалу E_x на металевому електроді, зануреному в розчин, що містить іони того ж металу, з якого виготовлено електрод, описується рівнянням Нернста, отриманим для розведених розчинів у припущенні, що поведінка іонів у них підкоряється законам для ідеальних газів:

В свою чергу утворення іонів в розчинах пов'язане з явищем електролітичної дисоціації, яке властиве будь-якому розчину і зумовлене утворенням в розчині електроіонів: позитивних іонів (катіонів) і негативних іонів (аніонів).

Більшість хімічних процесів відбувається в водних розчинів. Чиста вода являє собою нейтральну речовину і вона слабо дисоціює з утвореннями катіонів водню $[H^+]$ та аніонів гідроксилу $[OH^-]$: $H_2O \leftrightarrow [H^+] + [OH^-]$.

2) Потенціометричне титрування – метод, що оснований на вимірюванні потенціалу індикаторного електрода, потенціал якого служить індикатором для знаходження точки еквівалентності (точки кінця титрування) при протіканні реакції нейтралізації, осадження, окиснення-відновлення, комплексоутворення.

Метод потенціометричного титрування оснований на фіксуванні точки еквівалентності у робочому розчині по різкій зміні потенціалу індикаторного електрода, який реагує на зміну активності того чи іншого компонента або продукту реакції в розчині.

Потенціометричне титрування проводять наступним чином (Рис. 3.5.). В розчин, який підлягає титруванню поміщують індикаторний електрод, потенціал якого залежить від активності речовин, що беруть участь в реакції. Посуд із індикаторним електродом сполучають за допомогою сольового містка із електродом порівняння (каломельний, хлорсрібний), по відношенню до якого вимірюють потенціал індикаторного електрода. Ця система підключається до потенціометричної установки.

При додаванні розчину реагенту, який взаємодіє з визначуваною речовиною, активність потенціалвизначаючих іонів у розчині змінюється. Внаслідок цього змінюється і значення вимірюваної ЕРС. Залежність вимірюваної, в ході титрування ЕРС від об'єму доданого до розчину реагенту виражають графічно.

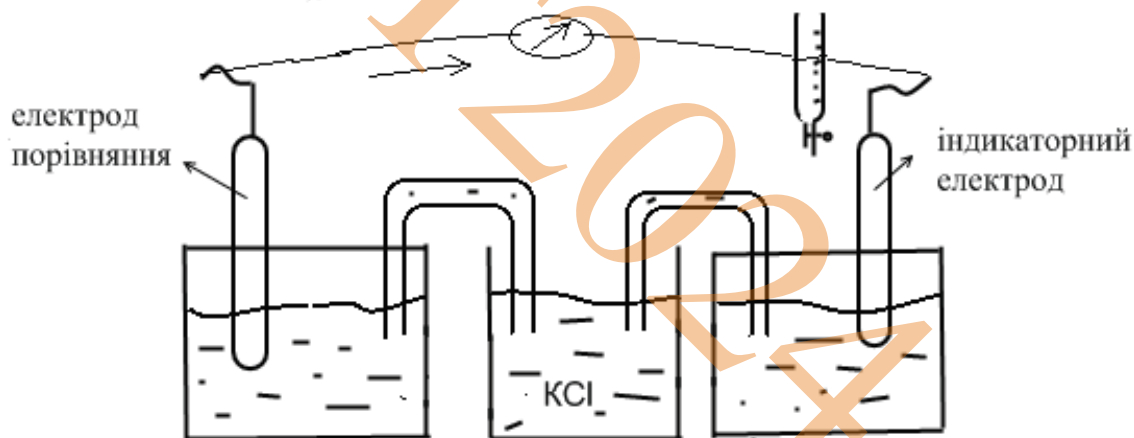


Рис. 3.5. Схема установки для потенціометричного титрування.

Таку графічну залежність називають кривою потенціометричного титрування (Рис. 3.6., а). Крива потенціометричного титрування може бути розділена на кілька частин. Початкова частина потенціометричної кривої (близько до 90% необхідного титранту) характеризується незначною зміною потенціалу індикаторного електрода. Поблизу точки еквівалентності незначна зміна активності (концентрації)

потенціовизначуваних іонів викликає різку зміну потенціалу індикаторного електрода. В практиці аналітичної хімії використовують термін «скачок титрування», який означає зміну потенціалу індикаторного електрода при зміні ступеня відтитрованості розчину від 99,9 до 100,1%. При подальшому додаванні титранта, після точки еквівалентності темп зміни потенціалу уповільнюється, а потім практично не змінюється.

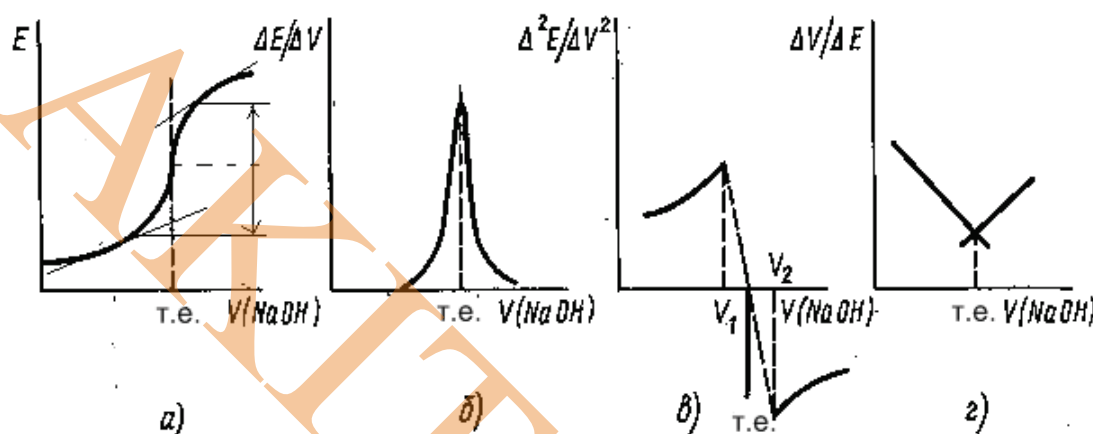


Рис. 3.6. Криві потенціометричного титрування:

а – звичайна крива, метод дотичних; б – диференціальна крива; в – крива титрування за другою похідною; г – крива Грана

В ході потенціометричного титрування проходять:

- 1) основна хімічна реакція титрування;
- 2) електрохімічна реакція на індикаторному електроді.

Ці реакції і забезпечують виникнення скачка потенціалу індикаторного електрода .

Вимоги, які ставляться до хімічних реакцій, що використовуються в потенціометричному титруванні, наступні:

- 1) реакції повинні протікати строго стехіометрично;

2) рівновага певної хімічної та індикаторної реакцій повинна встановлюватись швидко;

3) для досліджуваної реакції, повинен бути підібраний відповідний електрод, який реагує на зміну концентрації визначуваних речовин;

4) в розчині не повинні проходити побічні реакції.

Для реакцій, швидкість протікання яких мала, збільшують швидкість шляхом підбору умов (рН, розчинник, каталізатор, нагрівання та ін.), або використовують метод зворотнього титрування. До визначуваної речовини свідомо додають надлишок реагента, який відтитровують спеціально підібраним титрантом в присутності відповідного індикаторного електрода.

Класифікація методів потенціометричного титрування

За природою хімічної реакції методи потенціометричного титрування класифікують на наступні: нейтралізації, окиснення-відновлення, осадження, комплексоутворення.

В потенціометрії для створення інформації про склад речовини використовують такі потенціали:

- електродний, що виникає під час занурення металевих електродів у розчин їхніх іонів;

- мембранний, що виникає на мембранах, які мають селективну проникність для одного типу іонів (напів-проникні мембрани) і які поділяють два однакові розчини, що містять ці іони в різних концентраціях;

2.2. Принцип роботи потенціометричних датчиків

У загальному випадку, визначаючи електродний та інші потенціали, замість поняття концентрації c_{Me}^{++} використовують поняття активної (ефективної) концентрації (активності) a_{Me}^{++} , яка відображає той факт, що зі збільшенням концентрації іонів у розчині внаслідок їх взаємного впливу в утворенні електродного потенціалу бере участь лише частина з них. Тоді рівняння можна записати у вигляді:

$$E_x = E_0 + (RT/nF) \ln a_{Me}^{++}. (2)$$

Між активністю a_{Me}^{++} і концентрацією c_{Me}^{++} існує залежність

$$a_{Me}^{++} = k_a \cdot c_{Me}^{++}, (3)$$

де k_a - коефіцієнт активності.

Вимірювання поверхневого потенціалу електроду E_x дозволяє одержати інформацію про концентрацію контрольованих іонів в аналізованій рідині чи про її окислювально - відновні властивості.

Але виміряти такий потенціал тільки між одним електродом і розчином не можливо, так як при під'єднанні вимірювального приладу до розчину знову ж таки виникає потенціал між розчином та провідником, який з'єднує розчин з приладом. І відповідно різниця потенціалів, яку повинен виміряти прилад, буде дорівнювати нулю.

Поверхневий електродний потенціал вимірюють (рис.2,а) непрямим методом за електрорушійною силою (ЕРС) активного первинного вимірювального

перетворювача, складеного з вимірювального електрода (лівий на рис.2,а) і допоміжного (правий на рис.2,а, його ще називають порівняльним чи опорним) електрода. Обидва електроди утворюють гальванічний елемент, який занурено в досліджувану рідину, наприклад, електроліт, що знаходиться у вимірювальній

кюветі або протікає крізь неї. Потенціал вимірювального електрода E_X змінюється, якщо змінюється концентрація іонів в аналізованій рідині, а потенціал допоміжного електрода E_D залишається постійним, оскільки він не залежить від концентрації іонів в аналізованій рідині.

Електрорушійна сила E такого гальванічного елемента визначається різницею потенціалів вимірювального та порівняльного електродів:

$$E = E_X - E_D.$$

Для забезпечення однозначного зв'язку між ЕРС гальванічної елемента і концентрацією контрольованого іона вимірювальний електрод має бути селективним саме до цього іона і не реагувати на зміну концентрацій інших іонів, які містяться в аналізованій рідині.

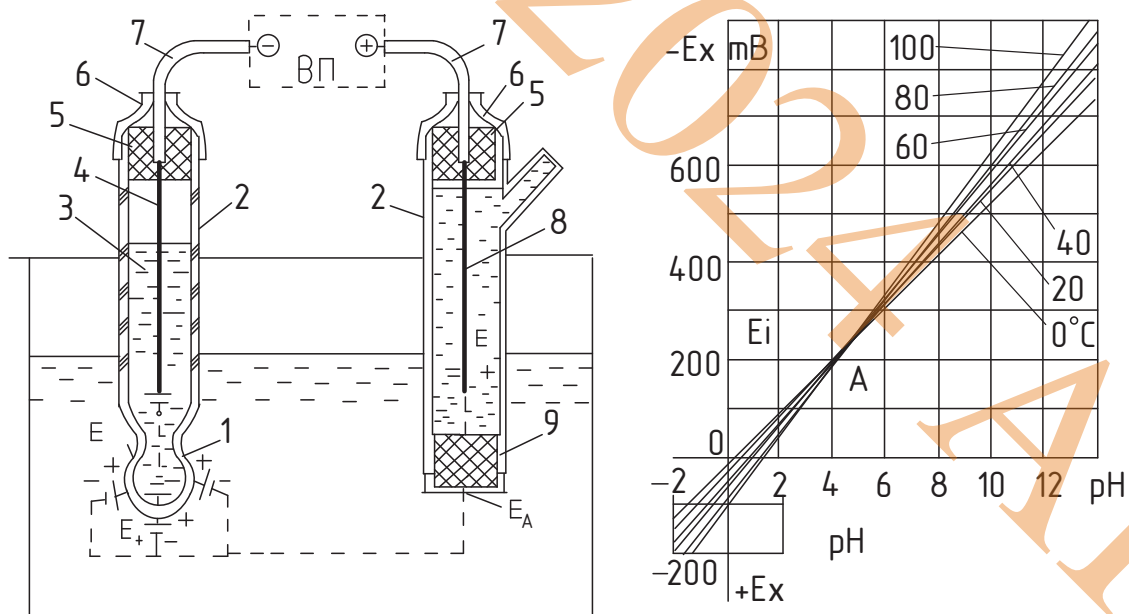


Рис.1.1 - Схема гальванічного перетворювача потенціометричного аналізатора типу т.Н.02 а) та залежність його ЕРС від рН і температури

У практиці аналітичного контролю технологічних процесів в харчовій промисловості широкого застосування набули іоноселективні електроди, характерною ознакою яких є те, що в електродних реакціях не беруть участі електрони, а основною є реакція обміну іонами між розчинами, розділеними мембраною, яка має селективну проникність для одного типу іонів. Найбільшого поширення потенціометричні методи набули для вимірювання активної концентрації іонів водню у водних розчинах, яка характеризує їх кислі, нейтральні чи лужні властивості.

Мембранні електроди — електрохімічні напівелементи електрохімічного ланцюга, потенціали яких залежать від активності у розчині іона, до якого селективний цей електрод. Потенціал ідеального І.е. описується рівнянням Нернста:

$$E = E^0 + \frac{2,3R \cdot T}{n \cdot F} * \lg a_i \quad (3.1)$$

де E^0 — стандартний електродний потенціал електрода; R — газова постійна; T — температура розчину, К; n — заряд іона з відповідним знаком; a_i — активність іона, до якого селективний електрод.

Величина $\frac{2,3R \cdot T}{n \cdot F} = S$ називається Нернстівським кутовим коефіцієнтом: при 25 °С для однозарядного іона $S=59,16$ мВ; для двозарядного — $S=29,58$ мВ. На потенціал реальних І.е. чинять деякий вплив також інші іони розчину, а не тільки ті, до яких електрод селективний. Цей вплив враховується рівнянням Нікольського:

$$E = E^0 + \frac{2,3R \cdot T}{n \cdot F} * \lg (a_A \sum_{j=1}^y K_{\frac{A}{B}} * a_{B_y}^{\frac{n_A}{n_B}}) \quad (3.2)$$

де A — іон, до якого електрод селективний; B — іон, до якого електрод неселективний; y — кількість іонів у розчині, до яких електрод неселективний; n_A , n_B — заряд іонів A і B відповідно з відповідним знаком; $K_{A/B}$ — потенціометричний коефіцієнт селективності електрода до іона B .

Чим менше значення $K_{A/B}$, тим менший вплив іона B на потенціал І.е.

Зм.	Арк	№ докум	Підпис	Дата

Наведені рівняння покладені в основу потенціометричного визначення іонів. І.е. — електрохімічна система, основним елементом якої є мембрана, проникна лише для іона, який аналізують. Мембрана розділяє два розчини електроліту: розчин, що аналізують (зовнішній розчин), та стандартний розчин (внутрішній). Внутрішній розчин має точно відому концентрацію іона, що аналізують. Між розчинами виникає різниця потенціалів, яка дорівнює сумі міжфазних потенціалів та внутрішнього дифузійного потенціалу. Для вимірювання цієї різниці потенціалів у зовнішній та внутрішній розчини вміщують два ідентичних електроди порівняння і приєднують їх до електровимірювального приладу, напр. до високоомного мілівольтметра. Вимірювана величина і є потенціалом І.е.[1]

Хімічна природа іонселективних електродів заснована на іонофорі (рис. 3.3), який є молекулою, яка вибірково зв'язується з певним іоном.

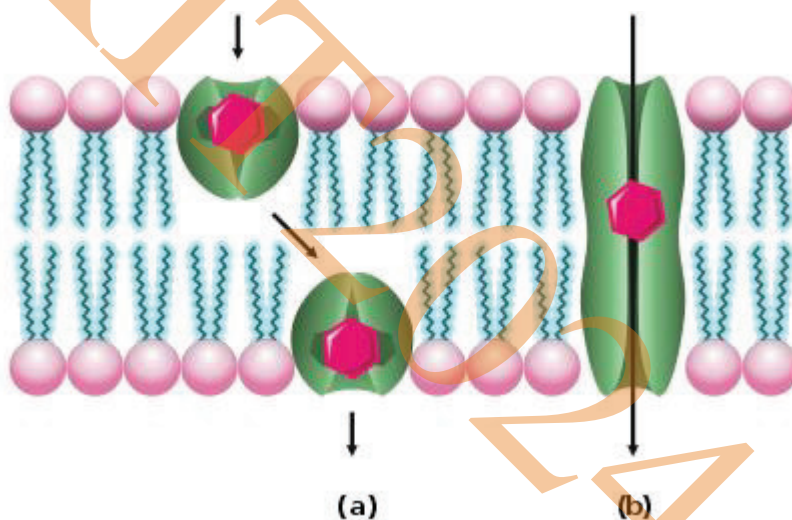


Рисунок 3.3 – Іонофор: а - Іонофори-носії оборотно зв'язують іони та переносять їх через клітинні мембрани; б - Канальні іонофори створюють канали в клітинних мембранах для полегшення транспортування іонів.[2]

Цей іонофор наноситься на поверхню електрода, що дозволяє йому вибірково зв'язуватися з цікавим іоном. Іонофор є критично важливим компонентом іонселективного електрода, оскільки його селективність щодо певного іона визначає чутливість, точність і специфічність електрода.

- окиснювально-відновний (редокс-потенціал),

електрохімічний

потенціал $\varphi_{\text{ox/red}}$, який виникає на хімічно інертному електроді (зазвичай платині, золоті, графіті або склі, модифікованому оксидами феруму, титану тощо) з електронною провідністю під час занурення його в розчин оборотної окисно-відновної системи, яка містить одночасно сполуку в окисненій і відновленій спряжених формах. Інертний електрод не має свого характерного стрибка потенціалу. О.-в.п. залежить від природи системи та співвідношення окисненої та відновленої форм.

Для одержання шкали О.-в.п. приймають загальний стандарт, потенціал якого умовно дорівнює нулю і відносно якого можна відраховувати інші потенціали. Загальним стандартом є водневий електрод $\text{H}^+ + \text{e}^- \leftrightarrow \frac{1}{2}\text{H}_2$. Потенціал водневого електрода $\varphi_{2\text{H}^+/\text{H}_2}$ приймається рівним нулю за умов, коли газоподібний водень перебуває під тиском 101 325 Па і знаходиться у рівновазі з іонами гідрогену, активність яких дорівнює одиниці ($a_{\text{H}^+}=1,0000$ моль/л ($f=1/2$, H_2SO_4)). У кількісній формі різницю між О.-в.п. будь-якого електрода і потенціалом водневого електрода визначають за рівнянням Нернста $E_{\text{h}} = \varphi_{\text{ox/red}} - 0 = E^0 + (RT/nF) \ln a_{\text{ox}}/a_{\text{red}}$, де a_{ox} і a_{red} — активності окисненої та відновленої форм сполуки відповідно; T — абсолютна температура, К; R — універсальна газова стала ($8,3143 \text{ Дж} \cdot \text{град}^{-1} \cdot \text{моль}^{-1}$); F — число Фарадея ($9,64872 \cdot 10^4 \text{ А} \cdot \text{с} \cdot \text{моль}^{-1}$); E_{h} — потенціал, віднесений до нормального водневого електрода у вольтах; E^0 — відповідає значенню E_{h} за активностей окисненої та відновленої форм, що дорівнюють одиниці, і називається *стандартним потенціалом* спряженої пари окисник-відновник. Величина E^0 залежить від співвідношення питомих швидкостей прямої й зворотної реакцій $\text{Ox} + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Red}$ за умови нульового значення електродного потенціалу за водневою шкалою $E^0 = (RT/nF) \ln K_{\text{пр}}/K_{\text{зв}}$, де $K_{\text{пр}}$ і $K_{\text{зв}}$ — константи швидкості прямої й зворотної реакцій відповідно. Оскільки відомості щодо коефіцієнтів активності частинок дуже обмежені, особливо у середовищі з відносно високою іонною силою, в якому зазвичай працюють, напр. під час аналітичних визначень, то вводять концентрації частинок. Якщо f_{ox} і f_{red} — коефіцієнти

Зм.	Арк	№ докум	Підпис	Дата

КМР.АКІТ.19050032. 01.000 ПЗ

Арк

19

активності частинок, рівноважні концентрації яких $[ox]$ і $[red]$ виражені у моль·л⁻¹, тоді $a_{ox} = f_{ox} \cdot [ox]$ і $f_{red} \cdot [red]$. Підставляючи їх у рівняння Нернста, одержуємо:

$$E_h = E^0 + (RT/nF) \ln f_{ox}/f_{red} + (RT/nF) \ln [ox]/[red].$$

Шляхом об'єднання перших двох членів у правій частині рівняння і позначення їх як $E^{0'}$ одержуємо:

$$E_h = E^{0'} + (RT/nF) \ln [ox]/[red],$$

де $E^{0'}$ — так званий *нормальний* або концентраційний (*формальний*) потенціал при одномолярних концентраціях окисненої *ox* і відновленої *red* форм частинок — нейтральних молекул або просто сольватованих іонів. $E^{0'}$ — це умовна константа, тому що може змінюватися залежно від значень коефіцієнтів активності f_{ox} і f_{red} , а отже, від іонної сили розчину, а отже — від природи і концентрації інших присутніх електролітів розчину. Слід зауважити, що навіть якщо $[ox]=[red]=1$ моль·л⁻¹, коефіцієнти активності будуть, поза сумнівом, змінюватися при варіюванні концентрації присутніх електролітів розчину. Тому необхідно зазначити, що концентрації *ox* і *red* дорівнюють 1 моль·л⁻¹, а не просто однакові. Однак у таких випадках будь-яка зміна $E^{0'}$ буде невеликою, оскільки у рівнянні використовується відношення коефіцієнтів активності. Отже, для оцінки окиснювальної здатності будь-якої окисно-відновної системи необхідно знати формальний потенціал за різних умов експерименту. Системи з більш високим О.-в.п. будуть окиснювати системи з більш низьким О.-в.п.

- дифузійний, який виникає у місці контакту двох розчинів однієї й тієї ж речовини, що мають різну концентрацію, або між двома розчинами різних речовин.

Електрорушійна сила досліджуваного елемента виражається як різниця між потенціалом електрода порівняння ($E_{ст}$) і потенціалом індикаторного електрода ($E_{інд}$):

$$E = E_{\text{ст}} - E_{\text{інд}} + E_{\text{д}},$$

де $E_{\text{д}}$ – дифузійний потенціал, або потенціал рідинного з'єднання.

Дифузійний потенціал, або потенціал рідинного з'єднання, виникає на границі між розчинами двох різних електролітів або розчинів різної концентрації одного електроліту. Виникнення дифузійного потенціалу обумовлено нерівномірним розподілом катіонів та аніонів уздовж границі розділу розчинів внаслідок розходження у швидкостях дифузії іонів через поверхню розділу. Розходження у швидкостях дифузії викликається різницею в рухливостях іонів. Залежно від заряду іонів, їх рухливостей, концентрації розчину, природи розчинника та інших факторів дифузійний потенціал змінюється в дуже широких межах: від десятих мілівольта до десятків мілівольт і більше. На практиці дифузійний потенціал прагнуть усунути за допомогою так названого сольового містка. Основним призначенням його є здійснення електролітичного контакту між розчинами, у які занурені електроди, однак з метою зменшення дифузійного потенціалу сольовий місток заповнюють концентрованим розчином електроліту із приблизно однаковими рухливостями катіона та аніона (KCl , NH_4NO_3 , KNO_3 та ін.). При роботі з неводними розчинами сольовий місток заповнюють спиртовими розчинами NaI і KSCN .

3 ОГЛЯД СУЧАСНИХ СИСТЕМ ВИМІРЮВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ІОНІВ В РІДИНАХ ТА КРОВІ

3.1 Основні принципи сучасних систем вимірювання концентрації іонів

1. Потенціометрія: Цей метод базується на вимірюванні різниці електричних потенціалів між іон-селективним електродом (наприклад, іон-селективний скляний електрод для H^+) і стандартним електродом. Він є поширеним завдяки простоті, низькій вартості та високій точності.

Одне з головних переваг цього методу - можливість роздільного визначення ряду близьких за властивостями компонентів одного і того ж розчину. Перевагами потенціометричного методу вимірювань є також його висока точність і чутливість.

2. Амперометрія та вольтамперометрія: Методи, що вимірюють електричний струм, що виникає при окисно-відновних реакціях іонів на електродах. Вони дозволяють визначати концентрацію іонів, що здатні брати участь у таких реакціях, як, наприклад, Fe^{2+} або O_2 .

Амперометрія — це метод, в якому вимірюється струм, що виникає в результаті електрохімічної реакції на електроді при постійній напрузі. Амперометрію широко використовують для визначення концентрації розчинених газів (наприклад, кисню), органічних сполук, а також у медичній та фармацевтичній промисловості. Метод є досить чутливим і може виявляти речовини у дуже низьких концентраціях. Також може використовуватися для моніторингу швидких реакцій.

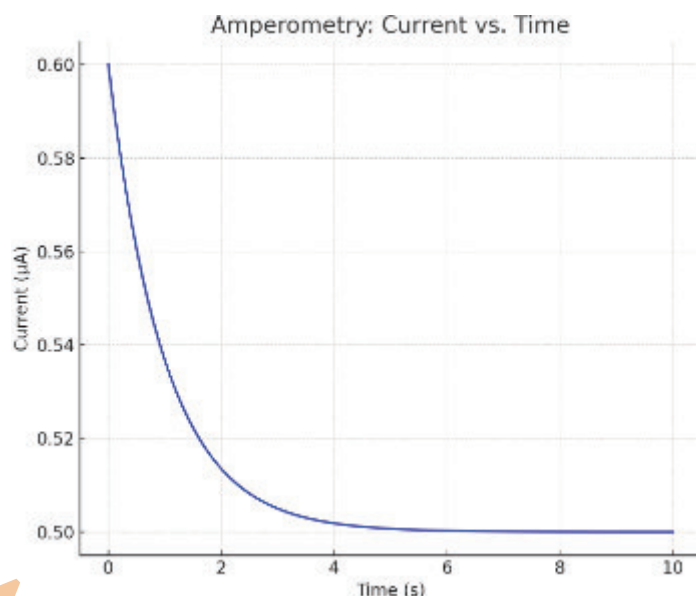


Рис.3.1. – Графік залежності струму від часу при постійній напрузі

Вольтамперометрія — це метод, де вимірюється залежність струму від змінної напруги, що прикладається до електрода. Існує декілька типів вольтамперометрії: лінійна, циклічна, диференційна та імпульсна.

Принцип дії: У вольтамперометрії потенціал робочого електрода поступово змінюється, і фіксується залежність струму від прикладеної напруги. Ця залежність, відома як вольтамперна крива, відображає реакцію аналіту та дозволяє визначити концентрацію речовини.

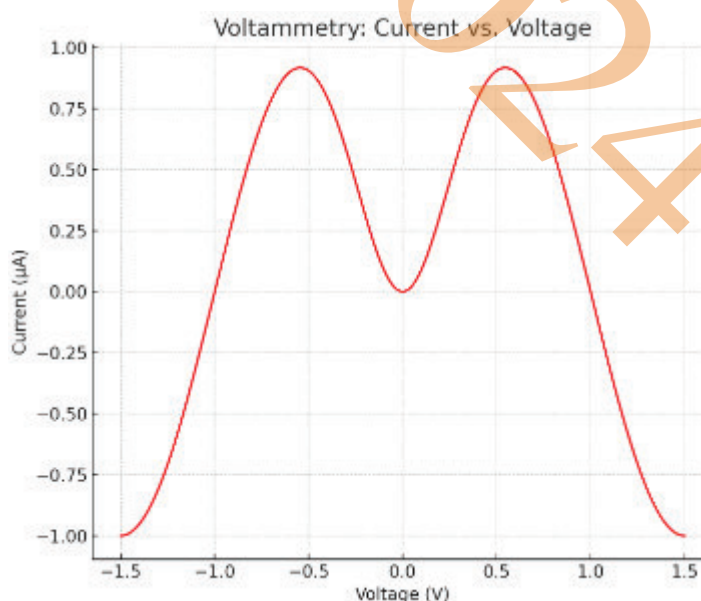


Рис.3.2. – Графік кривої із залежністю струму від змінної напруги

Застосування: Використовується для ідентифікації речовин, дослідження електрохімічних реакцій, вивчення кінетики та механізмів реакцій. Застосовується в аналізі металів, органічних сполук, фармацевтичних препаратів.

Обидва методи — амперометрія та вольтамперометрія — часто застосовуються в хімічному аналізі для кількісного та якісного визначення різних речовин. У той час як амперометрія є простішою для використання і забезпечує точне вимірювання концентрації при стабільних умовах, вольтамперометрія пропонує ширші можливості для дослідження характеристик та механізму електрохімічних реакцій.

3. Оптичні методи (спектроскопія) - Методи, що базуються на оптичних властивостях іонів (наприклад, колірних реакціях). Зокрема, флуоресцентні сенсори використовуються для вимірювання іонів, таких як Ca^{2+} , за зміною інтенсивності флуоресценції при взаємодії з іонами.

Флуоресцентні сенсори — це аналітичні пристрої, які використовують флуоресценцію для виявлення і вимірювання концентрації певних молекул або іонів у зразках. Вони базуються на здатності деяких речовин поглинати світло на одній довжині хвилі і випромінювати його на іншій довжині хвилі, що дозволяє отримати сигнали навіть при низьких концентраціях аналітів.

Принцип дії флуоресцентних сенсорів

Флуоресцентний сенсор складається з трьох основних елементів:

1. *Флуорофор* — молекула, яка поглинає світло і випромінює його на іншій довжині хвилі.
2. *Аналіт* — речовина, яку потрібно виявити або виміряти.
3. *Реагент або рецепторна молекула*, яка специфічно взаємодіє з аналітом і змінює флуоресценцію флуорофору у відповідь на його наявність.

При попаданні на флуорофор світла певної довжини хвилі (зазвичай УФ або видимого спектру), відбувається збудження електронів у молекулі. Збуджені

					KMP.AKIT.19050032. 01.000 ПЗ	Арк
Зм.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		24

електрони повертаються до свого основного енергетичного рівня, випромінюючи світло на іншій довжині хвилі (флуоресценція). Взаємодія з аналітом впливає на інтенсивність, довжину хвилі або поляризацію випромінюваного світла, що і використовується для аналізу.

Типи флуоресцентних сенсорів

1. Хімічні сенсори

Призначені для визначення концентрації певних іонів або молекул, таких як іони металів (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Zn^{2+} , Fe^{3+}), кисень, вуглекислий газ, рН, та ін.

Наприклад, флуоресцентні сенсори для іонів кальцію змінюють свою флуоресценцію при зв'язуванні з іонами Ca^{2+} .

2. Біосенсори

Використовують біологічні молекули, такі як ферменти, антитіла або нуклеїнові кислоти, для виявлення конкретних біомаркерів, вірусів, білків або ДНК.

Наприклад, флуоресцентні сенсори для глюкози використовують ферменти, що реагують з глюкозою, викликаючи зміну флуоресценції.

3. Клітинні сенсори

Виявляють біомолекули або іони всередині живих клітин і дозволяють проводити дослідження у реальному часі.

Використовуються для вивчення клітинних процесів, наприклад, обміну іонів або внутрішньоклітинного рН.

4. Наночастинкові сенсори

Використовують наночастинки як флуорофори (наприклад, квантові точки або флуоресцентні наноматеріали), що мають унікальні оптичні властивості, такі як висока стабільність і яскравість.

Застосовуються у біомедицині, хімічному аналізі та екологічному моніторингу.

3.2 Види систем вимірювання концентрації іонів

Стаціонарні лабораторні аналізатори

Стаціонарні лабораторні аналізатори є основою для проведення високоточних досліджень концентрації іонів у рідинах. Вони використовуються в широкому спектрі сфер: від наукових досліджень до контролю якості у промисловості та медицині. Ці прилади забезпечують стабільні результати завдяки їх високій чутливості, налаштуванню та стандартизації методів аналізу.

Сучасні стаціонарні аналізатори зазвичай використовують іон-селективні електроди (ICE), які дозволяють визначати концентрацію певних іонів, наприклад, натрію (Na^+), калію (K^+), кальцію (Ca^{2+}) або хлоридів (Cl^-). Принцип дії таких електродів базується на створенні потенціалу між чутливим шаром електрода і досліджуванним розчином, що залежить від концентрації аналізованих іонів.

Стаціонарні аналізатори забезпечують автоматичне калібрування, що дозволяє мінімізувати похибки вимірювання. Більшість таких систем мають можливості для зберігання даних, проведення обчислень і навіть автоматичної побудови звітів. Це значно спрощує процес роботи у лабораторії, особливо в умовах великого обсягу аналізів.

Однією з ключових особливостей є можливість роботи з широким спектром зразків. Такі аналізатори можуть аналізувати воду, розчини, біологічні рідини (наприклад, плазму крові, сечу) та навіть складні суміші, забезпечуючи високу

точність результатів. Вони також здатні працювати з великими обсягами зразків, що робить їх ефективними у масштабних дослідженнях.

Основними перевагами стаціонарних аналізаторів є їх довговічність, стабільність роботи та універсальність. Однак є й обмеження. Зокрема, ці прилади потребують спеціально обладнаного місця в лабораторії, доступу до електромережі, а також можуть бути дорогими у придбанні та обслуговуванні. Крім того, вони вимагають періодичного технічного обслуговування, включаючи заміну чутливих компонентів, таких як мембрани іон-селективних електродів.

Популярні моделі стаціонарних аналізаторів, такі як MC-3600 (рис.3.1) або Thermo Scientific Orion Versa Star Pro, пропонують розширені функції для вимірювань не лише іонів, але й інших параметрів, наприклад, рН, окисно-відновного потенціалу (ОРП) і температури. Це дозволяє проводити комплексний аналіз зразків в одній системі, що особливо цінується в лабораторіях із багатoproфільними дослідженнями.



Рис. 3.3. – Гематологічний аналізатор MC-3600

Стаціонарні аналізатори залишаються ключовими інструментами в багатьох галузях, де точність і надійність мають вирішальне значення.

Переносні системи для вимірювання концентрації іонів

Переносні системи для вимірювання концентрації іонів забезпечують зручність і мобільність, що робить їх незамінними в польових умовах, експрес-аналізах або ситуаціях, де немає можливості використовувати стаціонарні лабораторні прилади. Такі пристрої зазвичай компактні, працюють на батареях або акумуляторах і легко транспортуються.

Принцип роботи

Більшість портативних аналізаторів використовують ті ж іон-селективні електроди (ISE), що й стаціонарні системи, але в мініатюрному форматі. Вони оснащені вбудованим електронним модулем для обробки сигналів і відображення результатів на дисплеї. Прилади часто мають попередньо встановлені калібрувальні криві для різних типів іонів, що спрощує процес налаштування.

Особливості

- Компактність і невелика вага дозволяють використовувати прилади "на ходу".
- Простий інтерфейс і можливість швидкого отримання результатів.
- Деякі моделі підтримують бездротову передачу даних для подальшої обробки.
- Часто мають додатковий захист від вологи, пилу і механічних пошкоджень, що робить їх придатними для польових умов.

Переваги

- Мобільність: можливість виконувати вимірювання безпосередньо на місці.
- Швидкість: результат доступний протягом кількох секунд або хвилин.
- Простота в експлуатації: базові навички достатні для використання.

Недоліки

- Нижча точність у порівнянні зі стаціонарними приладами.
 - Менший ресурс роботи електродів через мініатюризацію.
 - Обмежена функціональність для комплексного аналізу.

Сфери застосування

- Польовий моніторинг якості води (озера, річки, ґрунтові води).
- Експрес-аналіз у промислових умовах.
- Ветеринарія та сільське господарство (аналіз ґрунту, кормів тощо).
- Діагностика в мобільних медичних лабораторіях.

Приклади популярних моделей

- Hanna Instruments HI98103 Checker pH Meter: простий і доступний інструмент для вимірювання pH і концентрації іонів.
- Horiba LAQUAtwin: серія портативних пристроїв для визначення іонів Na^+ , K^+ , NO_3^- , Ca^{2+} , pH.
- Oakton Ion 700: багатоцільовий аналізатор для роботи в лабораторних і польових умовах.



Рис.3.4 - HI98103 кишеньковий pH-метр CHECKER

Перспективи розвитку

Переносні системи продовжують удосконалюватися завдяки використанню нових матеріалів для електродів, інтеграції з мобільними пристроями та застосуванню технологій штучного інтелекту для обробки даних. Такі прилади стають все більш популярними, оскільки дозволяють проводити аналізи швидко і зручно в будь-яких умовах.

3.3 Новітні технології у вимірюванні концентрації іонів

Новітні технології у вимірюванні концентрації іонів забезпечують значні переваги завдяки використанню наноматеріалів, мініатюризації пристроїв та впровадженню штучного інтелекту для аналізу даних. Однією з найперспективніших інновацій є використання наноматеріалів у конструкції електродів. Матеріали, такі як графен, вуглецеві нанотрубки, металеві наночастинки (золото, срібло, платина), а також оксиди металів, значно підвищують чутливість і довговічність іон-селективних електродів. Їхня велика питома поверхня і унікальні електрохімічні властивості забезпечують швидшу реакцію на зміну концентрації іонів і точніше вимірювання. Такі електроди широко використовуються в біосенсорах для медичної діагностики, а також у портативних і стаціонарних аналізаторах для моніторингу якості води чи аналізу складних розчинів.



Рис.3.5. – Графеновий електрод

Іншим важливим напрямком є розвиток концепції "лабораторій на чіпі" (Lab-on-a-chip). Ці мікроскопічні пристрої дозволяють виконувати весь цикл аналізу — від підготовки зразка до вимірювання та отримання результатів — у межах одного чіпа. Вони засновані на використанні мікрофлюїдних технологій для управління рідинами і мають вбудовані сенсори для визначення концентрації іонів. Лабораторії на чіпі компактні, економічні у використанні реагентів і забезпечують швидке отримання результатів. Такі системи широко застосовуються в медичній діагностиці (аналіз крові, слини), екологічному моніторингу та контролі якості у промисловості.

Зм.	Арк	№ докум	Підпис	Дата

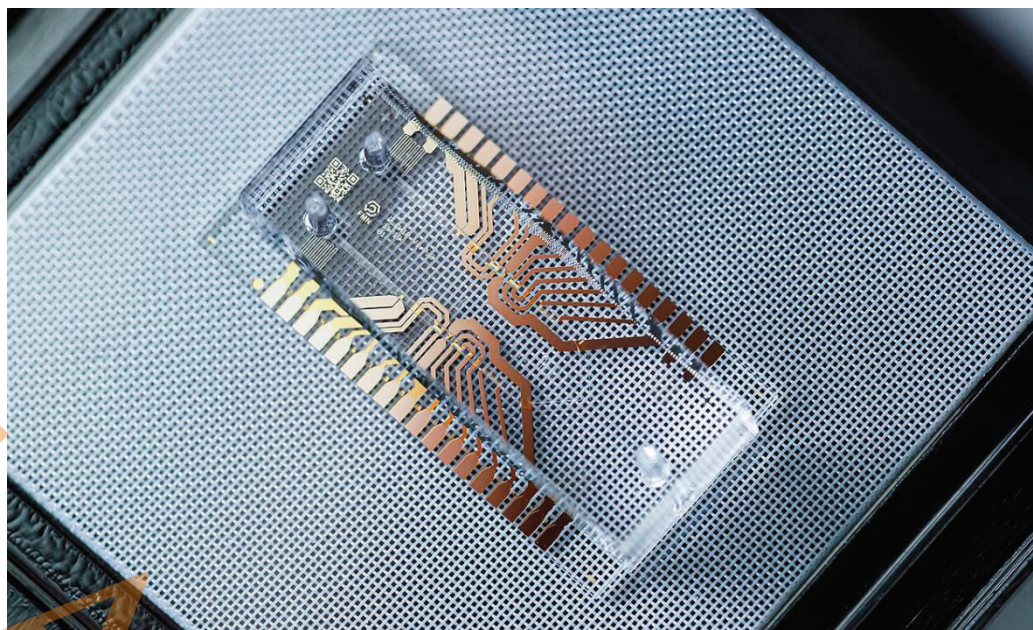


Рис.3.6 – Мікросхема повного аналізу (lab-on-a-chip або micro total analysis systems)

Штучний інтелект додає новий рівень ефективності у вимірюванні та обробці даних. Використання моделей машинного навчання дозволяє аналізувати великі обсяги даних, виявляти аномалії та прогнозувати можливі відхилення у концентрації іонів. ШІ також використовується для корекції похибок, спричинених зовнішніми факторами, такими як зміни температури чи забруднення зразка, а також для автоматизації процесу калібрування пристроїв. Інтеграція з інтернетом речей (IoT) дозволяє передавати дані в режимі реального часу на хмарні платформи для подальшого аналізу, що особливо корисно в медицині, екології та промисловості.

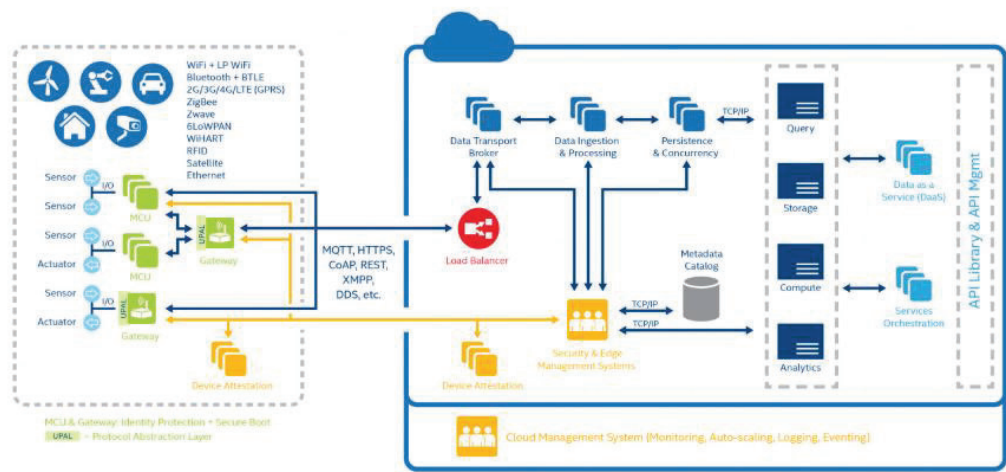


Рис. 3.7. – Схема IoT-аналізу

Ці технології відкривають нові горизонти для вимірювання концентрації іонів, забезпечуючи не лише високу точність, але й доступність аналізу навіть у польових умовах.

4 МЕТОДИКА КАЛІБРУВАННЯ

4.1 Опис техніки калібрування електрода та визначення точності вимірювань

Калібрування рН — це процес регулювання рН-метра шляхом вимірювання розчинів із відомим значенням рН. Це пояснюється тим, що характеристики електрода з часом змінюватимуться, і це потрібно компенсувати. Калібрування робить це шляхом відповідності вимірювань вашого рН-метра до відомих значень рН калібрувальних розчинів.

Для рН метра існують одноточкові, двоточкові та багатоточкові калібрування. По суті, саме в такій кількості точок виконується калібрування. Калібрування в одній точці можна використовувати, коли ви хочете виміряти послідовне значення рН з невеликими змінами. Цей метод передбачає використання лише одного буферного розчину як еталон для калібрування

Найпоширеніше калібрування рН-метра — це двоточкове калібрування і найкраще підходить, коли у вас є діапазон зразків рН. Буферні розчини повинні охоплювати значення вашого очікуваного зразка рН. При калібруванні рН-метр визначає нахил та похибку зміщення рН-електрода. Потім ця інформація дозволяє приладу відрегулювати рівні рН вимірювача відповідно до характеристик використовуваного електрода.

Частота калібрування рН-метра залежить від багатьох факторів, таких як тип тестових зразків, продуктивність електродів та вимоги точності. Для вимірювань з високою точністю ($\leq \pm 0,02$ рН) вимірювальний прилад слід щоразу калібрувати перед використанням. Для вимірювань загальної точності ($\geq \pm 0,1$ рН), після калібрування, прилад можна використовувати протягом тижня або довше. Перелік випадків коли вимірювач необхідно повторно відкалібрувати перед використанням:

- рН-електрод давно не використовувався або електрод абсолютно новий.
- Після вимірювання розчинів сильної кислоти (рН <2) або міцної основи (рН > 12).
- Після вимірювання розчину, що містить фтор та міцного органічного розчину.
- Велика різниця показань між температурою досліджуваного зразка та температурою буферного розчину, який використовується в останньому калібруванні.

Є простий спосіб швидко перевірити, чи потрібно проводити калібрування вашому рН-метру на даний момент. Все, що вам потрібно зробити, це занурити електрод рН у стандартні розчини для калібрування, такі як рН 4,00 або рН 7,00, і подивитися, чи мають вимірювання велику різницю до стандартного значення.

Для аналізаторів електролітів калію та натрію в стандартній крові, сироватці, плазмі та бікарбонатних розчинах використовують два методи калібрування абсолютної чутливості: калібрування за двома точками та калібрування за однією точкою.

Калібрування за двома точками проводять при кожному ввімкненні аналізатора, а також через кожні 4 години роботи приладу, яке є основним. Калібрування за однією точкою проводять через кожні 30 хвилин роботи приладу, яке є додатковим. Для цього використовують стандартні калібрувальні розчини (ацетати), стандарт 1 (FSB1) та стандарт 2 (FSB2), які визначають крайні точки діапазону вимірювань, а також еталонні взірці (NITS) для додаткового калібрування за однією точкою.

Стандарт 1:

$$K^{+} = 1.3 \text{ ммоль/дм}^3,$$

$$Na^{+} = 41 \text{ ммоль/дм}^3,$$

$$Ca^{+} = 2 \text{ ммоль/дм}^3,$$

$$Li^{+} = 0.6 \text{ ммоль/дм}^3.$$

Стандарт 2:

$$K^{+} = 5.0 \text{ ммоль/дм}^3,$$

$$Na^{+} = 149 \text{ ммоль/дм}^3,$$

$$Ca^{+} = 2.6 \text{ ммоль/дм}^3,$$

$$Li^{+} = 1.2 \text{ ммоль/дм}^3.$$

4.1 Калібрування приладу за двома точками

Подати на вхід первинного вимірювального перетворювача перший стандартний калібровочний розчин (стандарт1). Провести вимірювання першої різниці потенціалів E_1 для натрієвого та калієвого каналів.

Промити робочий канал.

Подати на вхід первинного вимірювального перетворювача другий стандартний калібровочний розчин (стандарт2). Провести вимірювання другої різниці потенціалів E_2 для кожного каналу.

Визначити коефіцієнт k для кожного із каналів згідно рівняння (5.6).

Визначимо передавальні характеристики (проведемо калібрування) для певного типу іонноселективних електродів. Із електричних характеристик мембранних електродів типу, різниця потенціалів між електродом порівняння і вимірювальним електродом для першого стандарту складає $E_1 = -142 \text{ мВ}$, а для другого стандарту $E_2 = -120 \text{ мВ}$ (для обох каналів).

Тоді підставляючи ці дані у формули (5.9) та (5.10) отримаємо :

а) для іона Na^+ :

$$C_x = \frac{149}{10^{0.56 \frac{-120 - E_x}{22}}} \quad (4.1)$$

б) для іона K^+ :

$$C_x = \frac{5}{10^{0.582 \frac{-120 - E_x}{22}}} \quad (4.2)$$

б) для іона Ca^{++} :

$$C_x = \frac{2,6}{10^{0.582 \frac{-120 - E_x}{22}}} \quad (4.3)$$

б) для іона Li^+ :

$$C_x = \frac{1,2}{10^{0.582 \frac{-120 - E_x}{22}}} \quad (4.4)$$

Побудуємо передавальні характеристики ПВП для кожного із каналів, враховуючи що концентрації, які відповідають стандартам 1-н та 2-а – є крайніми точками вимірювання концентрації електролітів в крові, сироватці або плазмі. Результати розрахунків приведені в Табл.6.1 і наведені на Рис.6.1 та Рис.6.2.

Таблиця 4.1 - Розрахунок передавальних характеристик

№	E, мВ	Концентрація іона калія, ммоль\дм ³	Концентрація іона натрія, ммоль\дм ³	Концентрація іона кальцію, ммоль\дм ³	Концентрація іона літію, ммоль\дм ³
1	-120	5,0	149,0	2,6	1,2
2	-121	4,7	140,5		
3	-122	4,4	132,5		
4	-123	4,2	125,0		
5	-124	3,9	117,9		
6	-125	3,7	111,2		
7	-126	3,5	104,8		
8	-127	3,3	98,9		
9	-128	3,1	93,2		
10	-129	2,9	87,9		
11	-130	2,7	82,9		
12	-131	2,6	78,2		
13	-132	2,4	73,7		
14	-133	2,3	69,5		
15	-134	2,1	65,6		
16	-135	2,0	61,9		
17	-136	1,9	58,3		
18	-137	1,8	55,0		
19	-138	1,7	51,9		
20	-139	1,6	48,9		

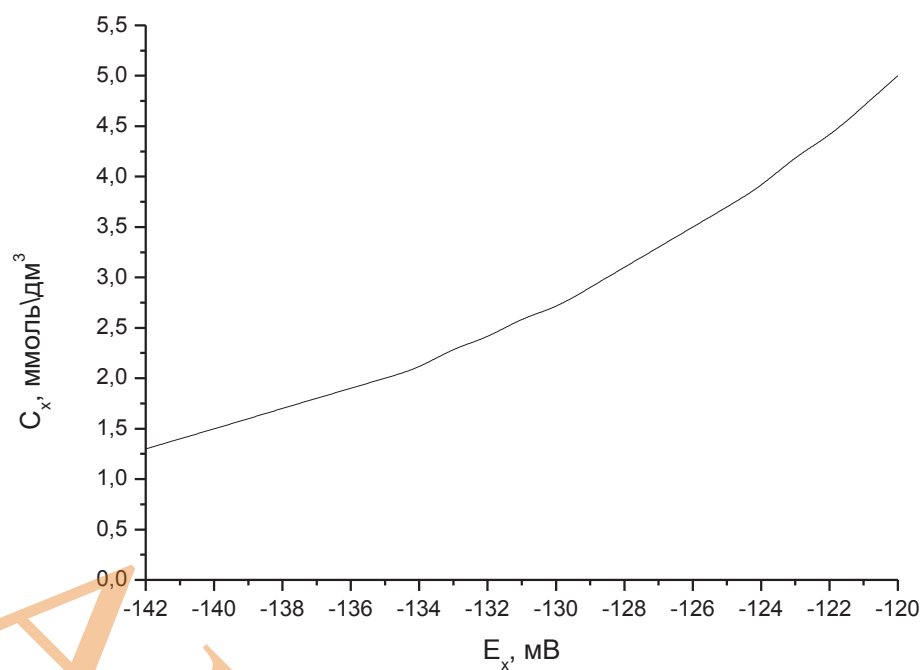


Рисунок 6.1 - Передавальна характеристика калієвого каналу

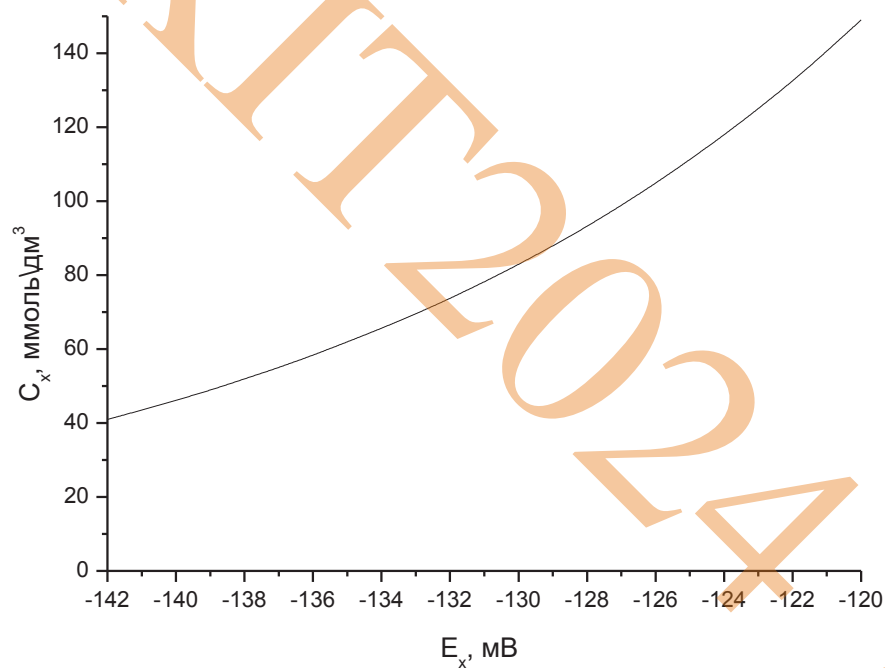


Рисунок 6.2 - Передавальна характеристика натрієвого каналу

4.2 Калібрування за однією точкою

Калібрування приладу за однією точкою можливо проводити лише у тому випадку, якщо попередньо проведено калібрування за двома точками і призводить до визначення положення прямої чутливості первинного вимірювального перетворювача (у одинарному логарифмічному масштабі).

Подати на вхід первинного вимірювального перетворювача сироватку із визначеними параметрами (концентрація сироватки по кожному вимірювальному елементу повинна бути в середині діапазону калібрування, що проведений за двома точками).

Згідно рівняння (6.5) отримаємо:

$$E_2 - E_5 = klg \frac{C_2}{C_5} \quad (6.3)$$

де E_s – різниця потенціалів на вході первинного вимірювального перетворювача при наявності в робочому каналі сироватки із концентрацією C_s .

Визначаємо потенціал E_2^* :

$$E_2^* - E_5 = klg \frac{C_2}{C_5} \quad (6.4)$$

Порівнюючи E_2 та E_2^* , визначається на скільки змінилась різниця потенціалів у першій точці і приймають за істинне значення для подальших розрахунків параметрів E_2^* , який відповідає концентрації C_2 першого стандарту калібрувального розчину після калібрування за однією точкою.

5 БЛОК КЕРУВАННЯ ТА ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ

5.1 Вибір мікроконтролера

Вибір мікроконтролера є важливим етапом розробки приладу для вимірювання концентрації іонів K^+ та Na^+ в рідинах. Одним зі значущих аспектів при виборі мікроконтролера є його функціональні можливості, які повинні задовольняти потреби розробленого приладу.

У даній дипломній роботі для реалізації приладу був вибраний мікроконтролер ATmega640. Зовнішній вигляд мікроконтролеру зображено на рис. 5.1. Основними чинниками, що сприяли вибору даного мікроконтролера, були його функціональні можливості та технічні характеристики.

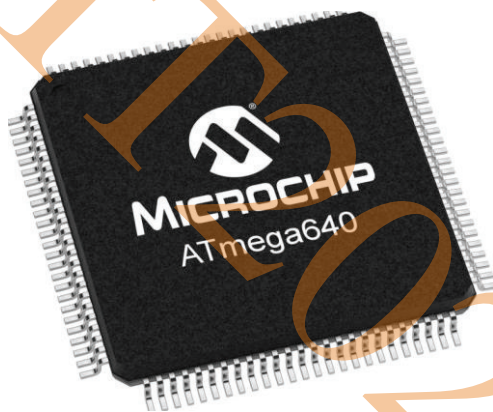


Рисунок 5.1 – Зовнішній вигляд мікроконтролеру ATmega640 [10]

Основні характеристики ATmega640 включають наступне:

Ядро та архітектура:

- 8-бітне RISC-ядро AVR.
- Внутрішня архітектура з 131 регістром.

Швидкість та частота:

- Максимальна частота роботи: 16 МГц або 20 МГц при використанні внутрішнього генератора.
- Один тактовий цикл виконується за один машинний цикл ($1/16 \text{ МГц} = 62.5 \text{ нс}$ або $1/20 \text{ МГц} = 50 \text{ нс}$).

Пам'ять:

- Внутрішня флеш-пам'ять: 64 Кбайт (з програмованою флеш-пам'яттю від 0 до 64 Кбайт).
- Внутрішня SRAM: 4 Кбайт.
- Внутрішня EEPROM: 2 Кбайт.
- Введено-вивідні піни:

Кількість введено-вивідних виходів: 64.

- 8 входів та виходів можуть бути налаштовані як 10-бітний аналого-цифровий перетворювач (ADC).
- 4 входів та виходів підтримують швидкий режим (High-Speed Mode) для високошвидкісних комунікаційних протоколів.

Мікроконтролер ATmega640 відмінно підходить для даної розробки, оскільки він має достатню потужність та ресурси для виконання необхідних обчислень та обробки даних. Зокрема, мікроконтролер має достатню кількість входів/виходів (I/O) для підключення необхідних сенсорів та електродів, а також можливість зв'язку з периферійними пристроями.

5.2 Розробка програмного забезпечення

У рамках розробки блоку обробки інформації, було розроблено наступні функції і алгоритми:

Зчитування даних з іоноселективного скляного електрода. Реалізовано код для зчитування потенціалу, виміряного іоноселективним скляним електродом, за допомогою аналогового вхідного піна мікроконтролера.

Забезпечено перетворення аналогового сигналу в цифровий формат з використанням внутрішнього АЦП мікроконтролера.

Обробка даних. Розроблено алгоритми для обробки отриманих даних з іоноселективного скляного електрода. Блок обробки інформації інтегрований у загальний алгоритм роботи системи.

Розроблено функцію промивки та калібрування. Під час калібрування система визначає параметри E_x і k для кожного іона, які використовуються для обчислення концентрацій у вимірювальній пробі. Результати калібрування та вимірювань зберігаються і використовуються для виведення інформації користувачу.

Реалізовано функції для обробки даних, включаючи перетворення аналогових значень у концентрацію та відображення результатів на дисплеї

На рис. 5.2 зображено блок схему алгоритму програми.



Рисунок 5.2 – Блок схема алгоритму

Для вимірювання концентрації іонів K^+ , Na^+ , Ca^+ та Li^+ за допомогою мікроконтролера ATmega640 використовується іоноселективні електроди, зчитуються їхні сигнали, обробляються дані відповідно до концентрації цих іонів і вивід їх на екран. Користуючись розробленою блок схемою отримуємо наступну програму:

```

#include <avr/io.h>

#include <util/delay.h>

#include <avr/interrupt.h>
  
```

```

// Константи для роботи з системою

#define MOTOR_DIRECTION_CW 1

#define MOTOR_DIRECTION_CCW 0

#define VALVE_OPEN 1 #define VALVE_CLOSE 0

// Ініціалізація UART для обміну даними (дисплей, логування)

void uart_init(uint16_t baudrate) {

    uint16_t ubrr = F_CPU / 16 / baudrate - 1;

    UBRR0H = (ubrr >> 8);

    UBRR0L = ubrr;

    UCSR0B = (1 << TXEN0) | (1 << RXEN0); // Включення передачі та
прийому

    UCSR0C = (1 << UCSZ01) | (1 << UCSZ00); // 8-бітний режим даних

}

void uart_transmit(char data) {

    while (!(UCSR0A & (1 << UDRE0))); // Очікуємо готовності буфера
UDR0 = data;

}

void uart_print(const char* str) {

    while (*str) { uart_transmit(*str++);

} } // Управління клапанами

void control_valve(uint8_t valve_pin, uint8_t state) {

    if (state == VALVE_OPEN) { PORTA |= (1 << valve_pin); // Відкриваємо
клапан }

    else { PORTA &= ~(1 << valve_pin); // Закриваємо клапан }

```

```

}

// Управління кроковим двигуном
void control_motor(uint8_t direction, uint8_t stop) {
    if (stop) { // Зупинка двигуна PORTC &= ~(1 << PC0) | (1 << PC1)); }
    else {
        if (direction == MOTOR_DIRECTION_CW) { PORTC |= (1 << PC0); //
Рух за годинником PORTC &= ~(1 << PC1);
        } else { PORTC |= (1 << PC1); // Рух проти годинника PORTC &= ~(1 <<
PC0); } } } // Читання стану оптопари uint8_t
    read_optopair(uint8_t opto_pin) {
        return PINA & (1 << opto_pin); // Зчитуємо стан піну }
    // Вимірювання потенціалів (імітація)
    float measure_potential() {
        // Реалізація залежить від підключення ADC // Нехай канал ADC0
зчитує потенціал
        ADMUX = (1 << REFS0); // Напруга відносно AVCC ADCSRA |= (1 <<
ADSC); // Запуск перетворення
        while (ADCSRA & (1 << ADSC)); // Очікуємо завершення
        return ADC * (5.0 / 1024.0); // Повертаємо значення вольт
    }
    // Калібрування
    void calibration_process() {
        uart_print("Калібрування розпочато...\n");
        control_valve(0, VALVE_OPEN); // Відкриваємо клапан Y2

```

```

control_motor(MOTOR_DIRECTION_CW, 0); // Запускаємо двигун
while (!read_optopair(3)); // Очікуємо сигнал від VD4
control_motor(MOTOR_DIRECTION_CW, 1);

// Зупиняємо двигун

float potential = measure_potential(); // Знімаємо потенціал
uart_print("Потенціал зчитано.\n");

control_valve(0, VALVE_CLOSE); // Закриваємо клапан Y2
control_valve(1, VALVE_OPEN); // Відкриваємо клапан Y5
control_motor(MOTOR_DIRECTION_CW, 0); // Зливаємо розчин
_delay_ms(1000); control_motor(MOTOR_DIRECTION_CW, 1);
// Зупиняємо двигун
control_valve(1, VALVE_CLOSE); // Закриваємо клапан Y5
uart_print("Калібрування завершено.\n"); } // Промивка
void washing_process(uint8_t cycles) {
for (uint8_t i = 0; i < cycles; i++) {
uart_print("Промивка почалась...\n"); control_valve(2, VALVE_OPEN);
// Відкриваємо клапан Y1
control_motor(MOTOR_DIRECTION_CW, 0);
// Запускаємо двигун
_delay_ms(1000);
control_motor(MOTOR_DIRECTION_CW, 1); // Зупиняємо двигун
control_valve(2, VALVE_CLOSE); // Закриваємо клапан Y1
control_valve(1, VALVE_OPEN); // Відкриваємо клапан Y5
control_motor(MOTOR_DIRECTION_CW, 0); // Зливаємо розчин
_delay_ms(1000); control_motor(MOTOR_DIRECTION_CW, 1);

```

Зм.	Арк	№ докум	Підпис	Дата


```

// Зупиняємо двигун
    control_valve(1, VALVE_CLOSE);

// Закриваємо клапан Y5
    uart_print("Промивка завершена.\n"); }

}

// Основний цикл
void main_loop() {
    while (1) { uart_print("Готовий до роботи.\n");
        calibration_process(); washing_process(3);
// Промивка // Виконуємо інші дії...
    }

// Головна функція
int main() {
    // Ініціалізація портів
    DDRA = 0xFF; // Порти A на вихід (клапани)
    DDRC = 0x03; // Порти C0, C1 на вихід (двигун)
    DDRA &= ~(1 << PA3); // Вхід для оптопари
    VD4 uart_init(9600); // Ініціалізація
    UART sei(); // Глобальне ввімкнення переривань
    main_loop(); // Запуск основного циклу
}

LiquidCrystal lcd(12, 11, 5, 4, 3, 2);

// Виходи для зчитування сигналів з іоноселективних електродів
const int kIonSensorPin = A0;

const int naIonSensorPin = A1;

```

```

void setup() {
    // Ініціалізація LCD екрану
    lcd.begin(16, 2);

    // Налаштування аналогових входів для зчитування сигналів
    pinMode(kIonSensorPin, INPUT);
    pinMode(naIonSensorPin, INPUT);
}

void loop() {
    // Зчитування значень з іоноселективних електродів
    int kSensorValue = analogRead(kIonSensorPin);
    int naSensorValue = analogRead(naIonSensorPin);

    // Конвертування значень в концентрацію іонів
    float kConcentration = map(kSensorValue, 0, 1023, 1, 10);
    float naConcentration = map(naSensorValue, 0, 1023, 10, 200);

    // Виведення результатів на LCD екран
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("K+:");
    lcd.print(kConcentration);
    lcd.print(" mmol/dm3");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Na+:");
    lcd.print(naConcentration);
    lcd.print(" mmol/dm3");

    delay(1000); // Затримка 1 секунда
}

```

}

Ця програма призначена для автоматизованого управління пристроєм іономіру на мікроконтролері ATmega640. Вона реалізує управління клапанами, кроковими двигунами, оптопарами та вимірювальними системами через аналогово-цифровий перетворювач (ADC), а також забезпечує обмін даними з користувачем через UART.

Код починається з налаштування UART для комунікації з дисплеєм чи іншими зовнішніми пристроями. Ініціалізується швидкість передачі даних, дозволяється передача і прийом, а також реалізовані функції для передачі символів і рядків тексту.

Для управління клапанами використовується порт PORTA, де кожен пін відповідає за один клапан. Для відкриття чи закриття клапана встановлюється або скидається відповідний біт порту. Аналогічно для управління кроковими двигунами використовується порт PORTC, де пін PC0 задає обертання за годинниковою стрілкою, а PC1 – проти годинникової стрілки. Реалізована можливість зупинки двигуна.

Оптопари використовуються для визначення положення рідини в системі. Зчитування стану оптопар здійснюється через порт PINA, і значення на певному піні дозволяє визначити, чи досягла рідина контрольної точки.

Для зчитування потенціалів електродів використовується ADC мікроконтролера. Канал ADC налаштовується на вимірювання напруги відносно напруги живлення (AVCC). Після завершення перетворення результат перетворюється у вольти для подальшого використання.

Процедура калібрування починається з відкриття клапана для стандартного розчину та увімкнення крокового двигуна. Оптопара визначає момент, коли розчин досяг вимірювального місця, після чого двигун зупиняється, потенціали

зчитуються, а система очищується шляхом відкриття клапана зливу та промивання.

Промивка системи передбачає кілька циклів відкриття клапанів для промивного розчину, запуск двигуна для його переміщення через систему, зливання використаного розчину та закриття клапанів. Кількість циклів промивки задається як параметр.

Основний цикл програми організований у функції `main_loop`, де пристрій постійно знаходиться в стані готовності до роботи, виконує калібрування за потреби, проводить вимірювання проби та очищає систему. Комунікація з користувачем реалізується через повідомлення на UART, які повідомляють про стан системи.

Програма налаштована на використання портів для підключення клапанів, двигунів та оптопар. Усі налаштування виконуються в основній функції `main`, яка також забезпечує увімкнення глобальних переривань і запуск основного циклу. Код легко адаптується для підключення до фізичних компонентів пристрою.

5.3 Вибір графічного дисплею

Одним із ключових компонентів автоматизованого лабораторного іономіра є дисплей, який виконує функції інтерфейсу між користувачем і приладом. Його вибір базується на необхідності забезпечення зручного відображення даних, надійного керування приладом і відповідності технічним вимогам пристрою. У даній роботі для реалізації цієї функції було обрано дисплей *7.0" SmartView HMI ESP32 800x480 RGB TFT LCD Touch Screen із корпусом*. Обґрунтування вибору наведено нижче.



1. **Розмір екрану:** має забезпечувати зручний перегляд інформації та графіків.
2. **Роздільна здатність:** повинна гарантувати чітке відображення тексту, числових даних і графіків.
3. **Сенсорний екран:** необхідний для інтуїтивного управління пристроєм.
4. **Захист корпусу:** дисплей має бути захищеним від пилу, вологи та механічних пошкоджень.
5. **Можливість інтеграції:** дисплей повинен легко взаємодіяти з іншими компонентами іономіра, такими як блок керування та обробки даних.
6. **Бездротове підключення:** підтримка Wi-Fi або Bluetooth для передачі даних і віддаленого доступу.

Проведений аналіз ринку дисплеїв дозволив виділити кілька популярних варіантів, які відповідають зазначеним критеріям. Серед них були розглянуті звичайні LCD дисплеї без сенсорного екрану, сенсорні TFT-дисплеї з мікроконтролерами та більш інтегровані рішення, які включають інтерфейс

KMP.AKIT.19050032. 01.000 ПЗ

користувача (HMI). Порівняння характеристик показало, що більшість альтернатив не забезпечують необхідного балансу між функціональністю, зручністю використання та простотою інтеграції.

Характеристики обраного дисплея

Дисплей 7.0" SmartView HMI ESP32 800x480 RGB TFT LCD Touch Screen із корпусом був обраний завдяки його відповідності технічним вимогам і перевагам, що забезпечують:

1. Розмір екрану 7.0 дюймів
 - Ідеально підходить для відображення великої кількості даних, таких як таблиці результатів, графіки калібрування або налаштування приладу.
 - Забезпечує зручний перегляд інформації для оператора навіть у лабораторних умовах, де пристрій може бути розташований на відстані.
2. Роздільна здатність 800x480 пікселів
 - Дозволяє чітко відображати текстову та графічну інформацію, що є критично важливим для точного зчитування даних.
 - Підтримує якісне візуальне оформлення інтерфейсу користувача.
3. Технологія TFT LCD
 - Забезпечує яскраве та чітке зображення під різними кутами огляду, що особливо важливо в умовах змінного освітлення лабораторії.
 - Енергоефективна та довговічна.
4. Сенсорний екран (Touch Screen)
 - Виключає необхідність використання фізичних кнопок, забезпечуючи інтерактивність і легкість у налаштуванні приладу.

- Підходить для роботи з багаторівневими меню, вибору режимів роботи, відображення результатів у вигляді графіків.

5. HMI (Human-Machine Interface) з мікроконтролером ESP32

- Інтеграція потужного мікроконтролера дозволяє не лише керувати дисплеєм, але й обробляти дані, передавати їх у мережу через Wi-Fi або Bluetooth, а також інтегрувати пристрій із системами лабораторної інформації (LIMS).
- Підтримка розробки індивідуальних інтерфейсів користувача для адаптації під конкретні потреби.

6. Захищений корпус

- Корпус дисплея забезпечує захист від механічних пошкоджень, пилу та вологи, що гарантує тривалий термін служби в умовах лабораторії.

Обґрунтування вибору

Обраний дисплей відповідає всім технічним і експлуатаційним вимогам, які ставляться до системи відображення автоматизованого іоніміра. Він забезпечує:

- Зручність у користуванні завдяки великому сенсорному екрану та інтуїтивно зрозумілому інтерфейсу.
- Надійність роботи в умовах лабораторії завдяки високій якості зображення і захищеному корпусу.
- Просту інтеграцію з іншими модулями пристрою та можливість віддаленого керування через Wi-Fi або Bluetooth.
- Високу адаптивність для відображення графіків, даних і налаштувань у зрозумілому форматі.

6 БЛОК ЖИВЛЕННЯ

6.1 Принцип побудови імпульсного блоку живлення

Імпульсний блок живлення (ІБЖ) побудований на принципах комутації і зміни часу вмикання та вимикання елементів для отримання необхідних значень напруги і струму на виході. Основні компоненти та принцип побудови ІБЖ включають наступні етапи:

Вхідний фільтр: ІБЖ може мати вхідний фільтр, що складається з конденсаторів і фільтруючих дроселів, які захищають внутрішні компоненти від спільного шуму та перешкод на вхідній лінії.

Вхідний виправляч: Цей блок перетворює змінний струм в постійний струм за допомогою мостового виправляча, що складається з діодів. В результаті отримується пульсуюча постійна напруга.

Вхідний фільтр ємності: Цей компонент складається з конденсатора, який згладжує пульсацію напруги, вилучаючи шум і забезпечуючи стабільну постійну напругу.

Імпульсний перетворювач (DC-DC конвертер): Це основний елемент імпульсного блоку живлення. Він складається з імпульсного трансформатора та вихідного ключа (транзистора або МОС-транзистора). Сигнал з контролера (такого як мікросхема UC3844) використовується для керування ключем. При вмиканні ключа енергія накопичується в імпульсному трансформаторі, а при вимиканні ключа ця енергія передається на вихідну обмотку трансформатора. Цей процес утворює високочастотні пульсації напруги на виході.

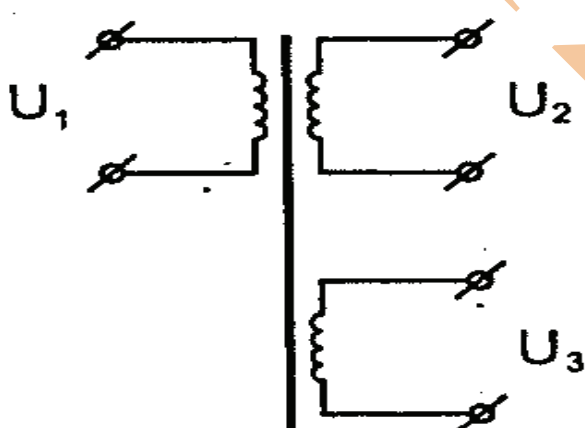
Вихідні стабілізатори: На виході ІБЖ можуть бути встановлені стабілізатори напруги, які забезпечують стабільний рівень напруги на виході незалежно від змін вхідної напруги та навантаження. Це можуть бути лінійні стабілізатори або комутаційні стабілізатори, такі як пристрої на основі ШИМ-регуляторів.

Вихідний фільтр: Для згладжування пульсацій напруги на виході ІБЖ та фільтрації високочастотних шумів може використовуватись вихідний фільтр, що складається з конденсаторів та фільтруючих дроселів.

Захист та контроль: ІБЖ також може мати вбудовані захисні функції, такі як захист від перевантаження, короткого замикання, перегріву тощо. Крім того, контролер може виконувати функції контролю параметрів, таких як вимірювання вихідної напруги або струму, та забезпечувати зворотний зв'язок для регулювання роботи блоку живлення.

Загальною метою побудови імпульсного блоку живлення є забезпечення стабільної та ефективної постачання напруги для різних електронних пристроїв. При правильному розрахунку та налагодженні ІБЖ можна досягти високої ефективності, низьких розмірів, малої ваги та надійної роботи блоку живлення.

6.2 Розрахунок трансформатора



Трансформатор містить одну первинну обмотку на яку подається напруга U_1 і дві вторинні, з яких знімаються напруги U_2 і U_3 . Частота струму вибирається з врахуванням характеристик компонентної бази, і вона становить 50 кГц. [11]

Рисунок 6.1 - Трансформатор [11]

Напруга U_1 на первинній обмотці визначається вхідною напругою джерела живлення. При вхідній напрузі 220 В однофазного струму, випрямленої діодним

мостом і залежної ємнісним фільтром, на первинну обмотку подається напруга, яка визначається за формулою (6.1)

$$U_1 = U_{\text{вх}} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \sqrt{2} - U_D \quad (6.1)$$

де $U_{\text{вх}}$ – напруга мережі, U_D – спад напруги на двох прямозміщених діодах, тоді:

$$U_1 = 220 \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \sqrt{2} - 3 = 195 \text{ В}$$

Напруги на другій і третій обмотках вказані з врахуванням падіння напруги на діодах вихідних випрямлячів: $U_2 = 5 \text{ В}$; $U_3 = 12 \text{ В}$.

Струми другої і третьої обмоток: $I_2 = 10 \text{ А}$; $I_3 = 2 \text{ А}$.

Вихідна потужність трансформатора:

$$P_2 = U_2 I_2 + U_3 I_3 \text{ Вт.} \quad (6.2)$$

$$P_2 = 5 \cdot 10 + 12 \cdot 2 = 74 \text{ Вт.}$$

Вхідний струм трансформатора:

$$I_1 = \frac{P_1}{U_1} \text{ А.} \quad (6.3)$$

$$I_1 = \frac{74}{195} = 0.38 \text{ А.}$$

Завкруглимо значення вхідного струму: $I_1 = 0,4 \text{ А}$.

Для наступних розрахунків необхідно задатися періодом T та часом відкритого положення $t_{\text{и}}$ силового транзистора одноктного зворотньоходового перетворювача (ОЗХП).

Нехай $T = 20 \text{ мкс}$, $t_{\text{и}} = 10 \text{ мкс}$. Робоча частота трансформатора при цьому буде рівною $f = 1/T = 50 \text{ кГц}$

Виберемо осердя трансформатора, в якості матеріалу якого буде використовуватись аморфний магнітний сплав ГМ54ДС-500, У якого наступні параметри:

ефективна магнітна проникність $\mu_{\text{ef}}=500$, в діапазоні

від 0 до 800 А/м;

індукція насичення $B_s=0,8\text{Тл}$.

Задамо параметрами петлі гістерезису, по якій має проходити перемagnetнення осердя: $B_0=0,15\text{Тл}$, $\Delta B=0,1\text{Тл}$. Тоді знайдемо

$$v_c = \frac{\mu_0 \mu_{\text{вф}}}{\Delta B B_0} P T \quad \text{м}^3 \quad (6.4)$$

$$v_c = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 500}{0,1 \cdot 0,15} \cdot 74 \cdot 20 \cdot 10^{-6} = 1,39 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$$

Знайденому значенню наближено відповідає ш-подібне осердя Ш7*7*15, у якого $V_c = 1,40 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$, $S=58\text{мм}$, $L=7\text{мм}$, $m=11\text{г}$.

Знайдемо число витків w_1 первинної обмотки з рівності енергетичного балансу:

$$w_1 = \frac{l}{\mu_0 \mu_{\text{вф}}} \cdot \frac{t_u}{t} \cdot \frac{U_{\text{ж}} B_0}{P} \text{ ВИТ} \quad (6.5)$$

$$w_1 = \frac{7 \cdot 10^3}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 500} \cdot \frac{20}{10} \cdot \frac{200 \cdot 0,15}{74} = 249 \text{ ВИТ}$$

Округлимо одержане значення числа витків до $w_1=250$ вит та уточнимо параметри петлі гістерезису:

$$B_0 = \frac{\mu_0 \mu_{\text{вф}} w_1}{L} \cdot \frac{T}{t_u} \cdot \frac{P}{U_{\text{ж}}} \text{ Тл} \quad (6.6)$$

$$B_0 = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 500 \cdot 250}{7 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{20}{10} \cdot \frac{74}{220} = 0,15 \text{ Тл}$$

$$\Delta B = \frac{U_{\text{ж}} \cdot t_u}{w_1} \text{ Тл} \quad (6.7)$$

$$\Delta B = \frac{220 \cdot 10}{250 \cdot 58} = 0,141 \text{ Тл}$$

Амплітуда змінної, складова індукції рівна:

$$B_d = \frac{\Delta B}{2} \text{ Тл} \quad (6.8)$$

Зм.	Арк	№ докум	Підпис	Дата

$$B_d = \frac{0,141}{2} = 0,071 \text{ Тл}$$

Знайдемо середнє значення H_0 і розмах ΔH напруженості магнітного поля

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0 \mu_{\text{вф}}} \text{ А/м} \quad (6.9)$$

$$\Delta H = \frac{\Delta B}{\mu_0 \mu_{\text{вф}}} \text{ А/м} \quad (6.10)$$

$$H_0 = 238 \text{ А/м}$$

$$\Delta H = 224 \text{ А/м}$$

Наближений вигляд петлі гістерезису, по якій має проходити пере намагнічування осердя, показано на рис. 8.2

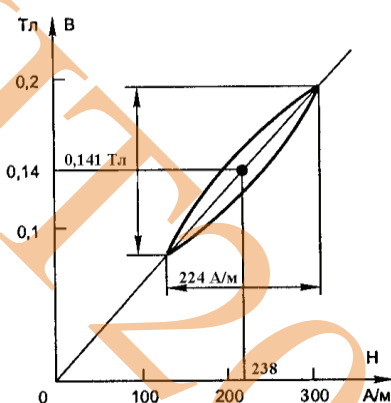


Рисунок 6.2 – Петля гістерезису [11]

Знайдемо мінімальне $i_{1\min}$ та максимальне $i_{1\max}$ значення струму первинної обмотки:

$$i_{1\min} = \frac{H_0 - \frac{\Delta H}{2}}{w_1} \quad (6.11)$$

$$i_{1\max} = \frac{H_0 + \frac{\Delta H}{2}}{w_1} \cdot L \quad (6.12)$$

$$i_{1\min} = \frac{238 - \frac{224}{2}}{250} \cdot 7 \cdot 10^{-3} = 35,3 \cdot 10^{-3} \text{ А}$$

Зм.	Арк	№ докум	Підпис	Дата

$$i_{1max} = \frac{238 - \frac{224}{2}}{250} \cdot 7 \cdot 10^{-3} = 90,8 \cdot 10^{-3} \text{ А}$$

Знайдемо дійсне значення струму i_1 , за наступною формулою:

$$I_1 = \sqrt{\frac{t_u}{3T} (i_{1min}^2 + i_{1min} i_{1max} + i_{1max}^2)} \text{ мА} \quad (6.13)$$

$$I_1 = \sqrt{\frac{10}{3 \cdot 20} (35,3^2 + 35,3 \cdot 90,8 + 90,8^2)} = 45,9 \text{ мА}$$

Прийнявши щільність струму в обмотках $j \approx 3 \text{ А/мм}^2$, знайдемо площу перерізу дроту первинної обмотки:

$$S_{пр1} = \frac{I_1}{j} \text{ мм}^2 \quad (6.14)$$

$$S_{пр1} = \frac{45,9 \cdot 10^{-3}}{3} = 0,0153 \text{ мм}^2$$

Визначимо діаметр дроту первинної обмотки:

$$d_{пр1} = \sqrt{\frac{4S_{пр1}}{\pi}} \text{ мм} \quad (6.15)$$

$$d_{пр1} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0153}{\pi}} = 0,139 \text{ мм}$$

В якості дроту первинної обмотки будемо використовувати дріт ПЭТВ-2 діаметром міді $d_{пр1} = 0,150 \text{ мм}$ (діаметр ізоляції $d_{пр1из} = 0,175 \text{ мм}$).

Визначимо число витків вторинних обмоток трансформатора. Обчислимо число витків першої вторинної обмотки, враховуючи, що вихідна напруга в даній обмотці складає $U_{н2} = 12 \text{ В}$.

$$w_2 = w_1 \frac{U_{н2}}{U_{ж}} \left(\frac{T}{t_u} - 1 \right) \text{ вит.} \quad (6.16)$$

$$w_2 = 200 \frac{12}{220} \left(\frac{20}{10} - 1 \right) = 27,3 \text{ вит.}$$

Завкруглимо отримане значення витків до $w_2 = 30 \text{ вит.}$

Аналогічно знайдемо число витків w_3 , другої вторинної обмотки, враховуючи, що її вихідна напруга складає $U_{H3} = 5 \text{ В}$:

$$w_2 = w_1 \frac{U_{H3}}{U_{ж}} \left(\frac{T}{t_u} - 1 \right) \text{ вит} \quad (6.17)$$

$$w_2 = 200 \frac{5}{220} \left(\frac{20}{10} - 1 \right) = 6,8 \text{ вит}$$

Завкруглимо отримане значення витків до $w_2 = 10$ вит.

На основі рівності $HL = w_{екв} i_2$ ми можемо зробити висновок, що струм i_2 є лінійно спадаючою функцією часу на проміжку закритого положення транзистора. Графік струму i_2 зображений на рис. 6.3

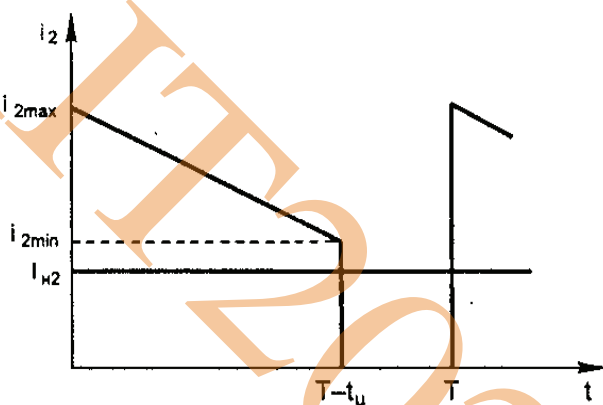


Рисунок 6.3 - Графік струму i_2 [11]

Для знаходження i_{2min} та максимального i_{2max} значення струму i_2 , необхідно спочатку визначити коефіцієнти a_2, a_3 . Знайдемо потрібні нам коефіцієнти:

$$a_2, a_3 = \frac{I_{H3}}{I_{H2}} \quad (6.18)$$

$$a_2, a_3 = \frac{0,015}{0,1} = 0,15$$

За наступною формулою знайдемо величину $w_{екв}$, яке можна назвати, як еквівалентне число витків вторинної обмотки, яке замінює дві вторинні обмотки реального трансформатора без порушення руху процесів намагнічування в осерді.

$$w_{\text{ex6}} = w_2 + W_2 a_2 + w_3 a_3 \quad (6.19)$$

$$w_{\text{ex6}} = 30 + 30 \cdot 0,15 + 10 \cdot 0,15 = 36$$

Тепер можна знайти значення $i_{2\text{min}}$ та максимального $i_{2\text{max}}$:

$$i_{2\text{min}} = \frac{H_0 - \frac{\Delta H}{2}}{w_{\text{BXB}}} \cdot L \quad (6.20)$$

$$i_{2\text{max}} = \frac{H_0 + \frac{\Delta H}{2}}{w_{\text{BXB}}} \cdot L \quad (6.21)$$

$$i_{2\text{min}} = \frac{238 - \frac{224}{2}}{36} \cdot 7 \cdot 10^{-3} = 24,5 \cdot 10^{-3} \text{ A}$$

$$i_{2\text{max}} = \frac{238 + \frac{224}{2}}{36} \cdot 7 \cdot 10^{-3} = 68,1 \cdot 10^{-3} \text{ A}$$

Визначимо дійсне значення струму I_2 , за наступною формулою:

$$I_2 = \sqrt{\frac{T - t_u}{3T} (i_{2\text{min}}^2 + i_{2\text{min}} i_{2\text{max}} + i_{2\text{max}}^2)} \text{ mA} \quad (6.22)$$

$$I_2 = \sqrt{\frac{20 - 10}{3 \cdot 20} (24,5^2 + 24,5 \cdot 68,1 + 68,1^2)} = 33,9 \text{ mA}$$

За наступною рівністю ми можемо знайти струм в третій обмотці:

$$I_3 = a_3 I_2 \text{ mA} \quad (6.23)$$

$$I_3 = 0,15 \cdot 33,9 = 5,09 \text{ mA}$$

Визначивши дійсні значення струмів у вторинних обмотках, знайдемо площу перерізу та діаметр проводів цих обмоток.

Для першої вторинної обмотки будемо мати:

$$S_{\text{пр2}} = \frac{I_2}{j} \text{ мм}^2 \quad (6.24)$$

$$S_{\text{пр2}} = \frac{33,9 \cdot 10^{-3}}{3} = 0,0113 \text{ мм}^2$$

$$d_{\text{пр2}} = \sqrt{\frac{4 S_{\text{пр2}}}{\pi}} \text{ мм} \quad (6.25)$$

$$d_{\text{пр2}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0113}{\pi}} = 0,189 \text{ мм}$$

В якості проводу даної обмотки будемо використовувати провід ПЭТВ-2 з діаметром міді $d_{\text{пр}2} = 0,200$ мм (з діаметром ізоляції $d_{\text{пр}2\text{из}} = 0,240$ мм).

Для другої вторинної обмотки будемо мати:

$$S_{\text{пр}3} = \frac{I_3}{j} 7 \text{ мм}^2 \quad (6.26)$$

$$S_{\text{пр}3} = \sqrt{\frac{5,09 \cdot 10^{-3}}{3}} = 0,0037 \text{ мм}^2$$

$$d_{\text{пр}3} = \sqrt{\frac{4S_{\text{пр}3}}{\pi}} \text{ мм} \quad (6.27)$$

$$d_{\text{пр}3} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0017}{\pi}} = 0,087 \text{ мм}$$

В якості проводу даної обмотки будемо використовувати провід ПЭТВ -2 з діаметром міді $d_{\text{пр}3} = 0,100$ мм.

Ізоляцію поверх сердечника накладувати не будемо, оскільки в нього вже є захисне покриття із полімерної плівки. З урахуванням цього внутрішній діаметр осердя складе $d_{\text{внутр}} = 11$ мм.

Знайдемо діаметр першого шару:

$$d_{\text{шр}3} = d_{\text{внутр}} - d_{\text{пр}1\text{из}} \text{ мм} \quad (6.28)$$

$$d_{\text{шр}3} = 11 - 0,175 = 10,825 \text{ мм}$$

Довжина першого шару складає:

$$l_{\text{шр}1} = \pi d_{\text{шр}1} \text{ мм} \quad (6.29)$$

$$l_{\text{шр}1} = \pi \cdot 10,825 = 38,9905 \text{ мм}$$

Максимальне число витків, яке може розміститись в першому шарі без врахування щільності намотки, складає:

$$W_{1\text{max}} = \frac{l_{\text{шр}1}}{d_{\text{пр}1\text{из}}} \text{ ВИТ} \quad (6.30)$$

$$W_{1\text{max}} = \frac{38,9905}{0,175} = 263,2 \text{ ВИТ}$$

Отже, первинна обмотка, яка містить 250 витків, цілком поміститься в першому шарі.

Поверх першого шару накладаємо міжшарову ізоляцію з лаковолкна ЛШМС-150-0,10 товщиною $\Delta_{из}=0,10$ мм з 50%-им перекриттям.

Другий шар залишимо для розміщення в ньому першої вторинної обмотки. Яка намотується проводом з діаметром ізоляції $d_{пр2из}=0,240$ мм.

Діаметр другого шару складає:

$$d_{ел2} = d_{ел1} - d_{пр1из} - 4\Delta_{из} - d_{пр2из} \text{ мм} \quad (6.31)$$

$$d_{ел2} = 10,825 - 0,150 - 4 \cdot 0,1 - 0,240 = 10,035 \text{ мм}$$

Довжина другого шару складає:

$$l_{шр2} = \pi d_{шр2} \text{ мм} \quad (6.32)$$

$$l_{шр2} = \pi \cdot 10,035 = 30,1099 \text{ мм}$$

Максимальне число витків, яке може розміститись в другому шарі без врахування щільності намотки, складає:

$$w_{2max} = \frac{l_{шр2}}{d_{пр2из}} \text{ вит} \quad (6.33)$$

$$w_{2max} = \frac{30,1099}{0,240} = 123,2 \text{ вит}$$

Отже, перша вторинна обмотка, яка містить 30 витків, цілком поміститься в другому шарі.

Поверх другого шару накладаємо міжшарову ізоляцію з лаковолкна ЛШМС-150-0,10 товщиною $\Delta_{из}=0,10$ мм з 50%-им перекриттям.

Третій шар залишимо для розміщення в ньому другої вторинної обмотки, яку намотаємо проводом з діаметром ізоляції $d_{пр3из}=0,128$ мм.

Діаметр третього шару складає:

$$d_{ел3} = d_{ел2} - d_{пр2из} - 4\Delta_{из} - d_{пр3из} \text{ мм} \quad (6.34)$$

$$d_{\text{ел3}} = 10,035 - 0,240 - 4 \cdot 0,1 - 0,128 = 9,037 \text{ мм}$$

Довжина третього шару складає:

$$l_{\text{шр3}} = \pi d_{\text{шр3}} \text{ мм} \quad (6.35)$$

$$l_{\text{шр3}} = \pi \cdot 9,037 = 28,098 \text{ мм}$$

Максимальне число витків, яке може розміститись в третьому шарі без врахування щільності намотування, складає:

$$w_{3\text{max}} = \frac{l_{\text{шр3}}}{d_{\text{пр3из}}} \text{ вит} \quad (6.36)$$

$$w_{3\text{max}} = \frac{28,098}{0,128} = 207,5 \text{ вит}$$

Отже, друга вторинна обмотка, яка містить 10 витків, цілком поміститься в третьому шарі. Поверх третього шару накладаємо міжшарову ізоляцію з лаковолокна ЛШМС-150-0,10 товщиною $\Delta_{\text{из}} = 0,10$ мм з 50%-им перекриттям.

Знайдемо діаметр отвору в готовому трансформаторі:

$$d_{\text{отв}} = d_{\text{шр3}} - d_{\text{пр2из}} - 4\Delta_{\text{из}} \text{ мм} \quad (6.37)$$

$$d_{\text{отв}} = 9,037 - 0,128 - 4 \cdot 0,1 = 8,509 \text{ мм}$$

Реально діаметр отвору буде меншим за розраховане значення, оскільки не враховувалась радіальна щільність намотування.

Знайдемо індуктивність первинної обмотки трансформатора:

$$L_1 = \mu_0 \mu_{\text{вф}} \frac{w_1^2 \cdot S}{L} \quad (6.38)$$

$$L_1 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 500 \cdot \frac{250^2 \cdot 58 \cdot 10^{-6}}{7 \cdot 10^{-3}} = 32,5 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$$

Знайдемо ідеальну потужність втрат в сердечнику:

$$P_{\text{уд}} = P_0 \left(\frac{f}{f_0}\right)^a \cdot \left(\frac{\Delta B}{B_0}\right)^\beta \text{ Вт/кг} \quad (6.40)$$

$$P_{\text{уд}} = 74 \left(\frac{50}{1}\right)^{1,48} \cdot \left(\frac{0,15}{0,14}\right)^{2,05} = 74 \cdot 50^{1,48} \cdot 1,07^{2,05} = 27,8 \text{ Вт/кг}$$

Тоді потужність розсіювання в осерді, складає:

					КМР.АКІТ.19050032. 01.000 ПЗ	Арк
Зм.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		65

$$P_c = P_{уд} m \quad (6.41)$$

$$P_c = 27,8 \cdot 10,8 \cdot 10^{-3} = 0,324$$

Очевидно, що отримана величина потужності не може призвести до значного перегріву осердя.

6.3 Вибір мікросхеми

Мікросхеми ШІМ-контролерів серії UC384х мають всі необхідні функціональні можливості для виконання схем управління мережевими імпульсними джерелами живлення перетворювачами постійний струм – постійний струм із зворотнім зв'язком по струму та постійною частотою перетворення. Вмонтовані структурні елементи мікросхеми забезпечують її відключення при недозволених низькій вхідній напрузі та струмі менше 1мА. Прецизійне джерело опорної напруги використовується для збільшення точності на вході підсилювача сигналу помилки. ШІМ – контролер контролює також граничні значення по струму. Вихідний каскад забезпечує роботу на навантаження типу n-канального польового транзистора з ізолюваним затвором та має низький логічний рівень напруги у відключеному положенні.

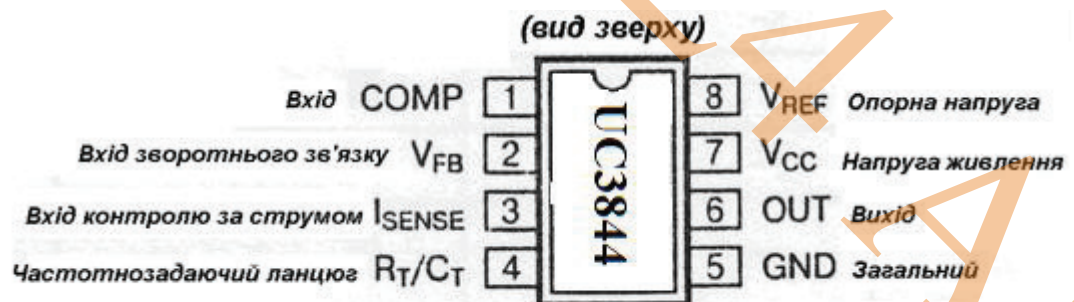


Рисунок 6.4 Мікросхема UC3844 [12]

На рисунку 6.4 зображено мікросхему в корпусі DIP-8, яка була обрана для блоку живлення.

Властивості мікросхеми:

- Призначена для мережевих джерел живлення
- Малий пусковий струм 1 мА
- Автоматична компенсація зворотнього зв'язку по напрузі
- Покращення характеристик навантаження
- Схема захисту з гістерезисом для відключення при недопустимо низькій вхідній напрузі
- Виключення подвійних імпульсів
- Вмонтоване джерело опорної напруги
- Робоча частота до 500 кГц

6 ОПИС РОБОТИ ПРИЛАДУ

Розглянемо опис роботи приладу на прикладі комбінованої функціональної схеми (КБР.АКІТ.190532.01.000 С2).

Оскільки, як відомо із пункту 6, перед початком проведення будь-яких вимірювань необхідно провести калібрування приладу, почнемо опис роботи приладу саме з цієї процедури.

Процес калібрування.

Отже, починається процес проведення калібрування із внутрішнього сигналу мікроконтролера про необхідність проведення останнього. Після чого на дисплеї з'явиться наступна інформація для користувача - "Калібрування". Після цього мікроконтролер відкриває електромагнітний клапан Y_2 і подає сигнали керування на пристрій управління кроковим двигуном, який вмикає останній у напрямку руху за годинниковою стрілкою.

Розчин першого стандарту, що знаходиться у об'ємі A_2 надходить у вимірювальний місток, створюючи відповідну різницю потенціалів між вимірювальними (калієвим і натрієвим) та порівняльними електродами. Кількість розчину, яка необхідна для проведення вимірювання першого стандарту визначається за допомогою двох оптопар VD_3 та VD_4 . Коли розчин доходить до оптопар VD_4 , змінюється її вихідний логічний рівень і мікроконтролер подає сигнал зупинки роботи крокового двигуна. Потенціали з кожного електрода подаються на відповідні виходи операційних підсилювачів, що розташовані у блоці підсилення. Далі отриманий підсилений сигнал подається у мікроконтролер де він обробляється і зберігається у відповідних комірках пам'яті. Після цього мікроконтролер перекриває клапан Y_2 , відкриває клапан Y_5 і вмикає кроковий двигун у напрямку руху за годинниковою стрілкою, зливаючи використаний розчин у об'єм «Злив».

					КМР.АКІТ.19050032. 01.000 ПЗ	Арк
Зм.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		68

Наступний крок - процес промивки. Мікроконтролер закриває клапан Y_5 і відкриває клапан Y_1 . Після цього розчин для промивки надходить у соляний місток із об'єму A_1 за рахунок ввімкнення крокового двигуна у напрямку руху за годинниковою стрілкою. Цей розчин взаємодіючи з поверхнями іоноселективних мембран електродів змиває залишки іонів натрію і калію з поверхонь останніх. Далі мікроконтролер закриває клапан Y_1 , відкриває клапан Y_5 і вмикає кроковий двигун у напрямку руху за годинниковою стрілкою, зливаючи використаний розчин у об'єм «Злив». Процес промивки проводиться 2 – 3 рази.

Наступним етапом є визначення різниці потенціалів для другого стандарту, який знаходиться у об'ємі A_3 . Процес вимірювання аналогічний до вимірювання різниці потенціалів першого стандарту. На прикінці вимірювання відбувається процес промивки.

Після визначення E_1 та E_2 (див. пункт 5) для кожного вимірювального іона, мікроконтролер розраховує відповідні коефіцієнти k (для іонів натрію, калію, кальцію та літію) за формулою (5.6). після цього на індикаторі «Дисплей» з'являється наступна інформація для користувача – «Готовий до процесу вимірювання».

Процес вимірювання .

Коли оператор прочитає повідомлення «Готовий до процесу вимірювання», можна починати проводити дослідження проби. Спочатку проба підноситься до капіляру «Проба» і натискається кнопка «Почати вимірювання», що знаходиться у блоці «Клавіатура». Мікроконтролер сприймає команду «Почати вимірювання» і подає сигнал керування на пристрій управління роковим двигуном, який вмикає останній у напрямку руху за годинниковою стрілкою при цьому попередньо відкривши клапан Y_5 . Проба затягується у вимірний місток і там зупиняється за рахунок контролю її місцезнаходження через оптопари VD_3 і VD_4 . Двигун вимикається. Далі вимірюється різниця потенціалів для кожного досліджуваного клапана і за формулою (5.7) розраховується мікроконтролером концентрації іонів натрію і калію у пробі. Результати вимірювання виводяться на «Дисплей» у

ммоль/дм³. Після проведення вимірювання, проба зливається у об'єм «Злив» і відбувається процес промивки. Прилад готовий до вимірювання проби.

Оператор повинен проводити калібрування за двома точками один раз на 4 години та за однією точкою через кожні 30 хвилин або через кожні 10 процесів вимірювання.

					КМР.АКІТ.19050032. 01.000 ПЗ	Арк
Зм.	Арк	№ докум	Підпис	Дата		70

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі була проведена розробка приладу для визначення концентрації іонів K^+ , Na^+ , Ca^+ та Li^+ в рідинах за допомогою потенціометричного методу. На основі проведених досліджень були отримані наступні результати:

Проведено порівняння з аналогічними комерційними приладами підтвердили високу ефективність та точність розробленого приладу для визначення концентрації іонів K^+ , Na^+ , Ca^+ та Li^+ в рідинах. Результати вимірювань були в межах допустимих похибок, що свідчить про надійність та готовність приладу до використання в різних дослідницьких та промислових областях.

Розроблений блок обробки інформації на базі мікроконтролера ATmega640 забезпечує зручне та ефективне збирання даних з датчиків, обчислення концентрації іонів K^+ , Na^+ , Ca^+ та Li^+ та візуалізацію результатів на екрані.

Розроблений блок живлення, що включає трансформатор і імпульсний блок живлення, забезпечує стабільне та надійне живлення приладу від мережі з напругою 220 В та частотою 50 ± 1 Гц. Використання такого блоку живлення дозволяє забезпечити ефективну роботу приладу при відповідності вхідним вимогам струму та напруги.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Іоноселективні електроди [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.pharmencyclopedia.com.ua/article/3374/ionoselektivni-elektrodi>
2. Іонофор [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://wiki5.ru/wiki/Ionophore>
3. Потенціометричний метод аналізу [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://stud.com.ua/180292/ekologiya/potentsiometricheskiy_metod_analizu
4. Ion-selectives electrodes [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.slideshare.net/dilshadambady/ion-selective-electrodesise>
5. Аналізатор електролітів крові HTI E-Lyte Plus [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://foramed.com.ua/laboratorna-diagnostika/analizatori-elektrolitiv-krovi/analizator-elektrolitiv-krovi-hti-e-lyte-plus.html>
6. Аналізатор газів крові і електролітів GEM Premier 3500 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://prom.ua/ua/p1128858985-analizator-gazov-krovi.html>.
7. Буферний розчин [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D1%83%D1%84%D0%B5%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%B9_%D1%80%D0%BE%D0%B7%D1%87%D0%B8%D0%BD.
8. Іоно-селективні електроди [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.referat911.ru/Himiya/onoselektivn-elektrodi-z-rdkimi-plastifikovanimi/572282-3376626-place2.html>

9. Інструментальні методи хімічного аналізу [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://udhtu.edu.ua/wp-content/uploads/2018/03/Instrumentalni-metodi-himichnogo-analizu.pdf>.
10. Atmega640 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.microchip.com/en-us/product/ATMEGA640..>
11. Dwight R. R. Design of low power pulse transformers / Richard Robinson Dwight. – Massachusetts: Digital computer laborator massachusetts institute of technology. – 87 с.
12. Склоаний електрод комбінований лабораторний ЕСК-10603 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://prom.ua/ua/p62719784-elektrod-steklyannyj-kombinirovannyj.html>