

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем

ЯЦИНА ЛЮДМИЛА ВОЛОДИМИРІВНА

Портативний прилад вимірювання рівня рН у рідинах /
Portable pH meter for liquids

спеціальність 152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка
освітньо професійна програма – Технології інтернету речей

Кваліфікаційна робота

Виконав студент групи
МТІРЗ – 41/1 Яцина Л.В

Науковий керівник :
к.т.н. доцент Б.О.Масляк

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту

«___» _____ 2026р.

Завідувач кафедри

_____ А.І.Сегін

Тернопіль - 2026

Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Освітній ступінь "бакалавр"

Спеціальність: 152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка
Освітньо-професійна програма – Технології інтернету речей

“ЗАТВЕРДЖУЮ”
Завідувач кафедри СКС

_____ А.І. Сегін
“ ____ ” _____ 2025р.

ЗАВДАННЯ

НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Яцині Людмилі Володимирівні

(прізвище, ім'я по-батькові)

1. Тема випускної кваліфікаційної роботи

Портативний прилад вимірювання рівня рН у рідинах / Portable pH meter for liquids

Керівник роботи _____ к.т.н., доцент Б.О.Масляк

затверджені наказом по університету від «1» грудня 2025р. № 894

2. **Строк подання студентом закінченої випускної кваліфікаційної роботи:** 25 травня 2026р.

3. Вихідні дані до випускної кваліфікаційної роботи:

1. Особливості вимірювання рівню рН
2. Методи вимірювання та моніторингу рівню рН у рідинах
3. Характеристики сенсорної та мікроконтролерної бази

4. Основні питання, які потрібно розробити:

1. Аналіз особливостей будови та функціонування портативних приладів вимірювання рівню рН у рідинах.
2. Проектування структури портативного приладу.
3. Програмно-апаратна реалізація вимірювального кола та цифрової обробки виміряних сигналів.

5. Перелік графічного матеріалу у роботі:

1. Структурна схема портативного приладу.
2. Структурна схема підключення сенсорів в режимі вимірювань.

3. Апаратно-програмна реалізація портативного приладу вимірювань рівню рН у рідинах.

6. Консультанти розділів випускної кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	Масляк Б.О.		
2	Масляк Б.О.		
3	Масляк Б.О.		

7. Дата видачі завдання 1 грудня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назви етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз ринку та технічних характеристик вимірювачів рН	01.12.2025р. – 15.01.2026р.	
2	Проектування структури та основних вузлів портативного пристрою	16.01.2026р. – 15.03.2026р.	
3	Апаратно-програмна реалізація основних компонентів пристрою	16.03.2026р. – 30.04.2026р.	

Студент

(підпис)

Яцина Л.В.

Керівник роботи

(підпис)

к.т.н., доц. Масляк Б.О.

РЕФЕРАТ

Бакалаврська робота присвячена розробці портативного приладу для вимірювання рівня рН рідин на основі сучасної мікроконтролерної платформи ESP32. Актуальність роботи обумовлена необхідністю оперативного контролю кислотно-лужного балансу рідин у промисловості, сільському господарстві, екологічному моніторингу.

У роботі проведено аналіз фізико-хімічних основ вимірювання водневого показника рН, розглянуто принципи роботи скляних електродів та особливості їх використання у вимірювальних системах. Виконано огляд сучасних методів та засобів вимірювання рН, проведено порівняльний аналіз існуючих портативних і стаціонарних рН-метрів.

Розроблено структурну схему приладу, що включає рН-електрод, аналоговий підсилювальний тракт, аналого-цифровий перетворювач та мікроконтролер ESP32. Особливу увагу приділено проектуванню аналогової частини вимірювального каналу, яка забезпечує високий вхідний опір, необхідний для роботи зі скляним рН-електродом. Виконано схемотехнічне проектування цифрової частини приладу на базі ESP32, що забезпечує обробку вимірювальної інформації, реалізацію алгоритмів калібрування, компенсацію температурних впливів та відображення результатів вимірювання.

Розроблено програмне забезпечення для мікроконтролера ESP32, яке реалізує зчитування даних з вимірювального каналу, перетворення напруги у значення рН та відображення інформації на дисплеї.

У роботі розглянуто питання метрологічного забезпечення приладу, зокрема методику двоточкового та триточкового калібрування за допомогою буферних розчинів. Проведено аналіз джерел похибок та оцінювання невизначеності результатів вимірювань відповідно до вимог міжнародних рекомендацій з оцінювання невизначеності вимірювань.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: РН-МЕТР, РН-ЕЛЕКТРОД, ВИМІРЮВАННЯ КИСЛОТНОСТІ, КАЛІБРУВАННЯ, НЕВИЗНАЧЕНІСТЬ ВИМІРЮВАНЬ

ABSTRACT

The bachelor's thesis is devoted to the development of a portable device for measuring the pH level of liquids based on the modern ESP32 microcontroller platform. The relevance of the work is due to the need for operational control of the acid-base balance of liquids in industry, agriculture, and environmental monitoring.

The work analyzes the physicochemical foundations of measuring the hydrogen pH indicator, considers the principles of operation of glass electrodes and the features of their use in measuring systems. A review of modern methods and means of measuring pH is carried out, and a comparative analysis of existing portable and stationary pH meters is carried out. A structural diagram of the device has been developed, which includes a pH electrode, an analog amplifier circuit, an analog-to-digital converter, and an ESP32 microcontroller. Particular attention is paid to the design of the analog part of the measuring channel, which provides high input resistance, necessary for working with a glass pH electrode.

The circuit design of the digital part of the device based on ESP32 has been performed, which provides processing of measurement information, implementation of calibration algorithms, compensation of temperature effects and display of measurement results. Software for the ESP32 microcontroller has been developed, which implements reading of data from the measurement channel, conversion of voltage into pH value and display of information on the display. The paper considers the issue of metrological support of the device, in particular the method of two-point and three-point calibration using buffer solutions. An analysis of sources of errors and assessment of uncertainty of measurement results in accordance with the requirements of international recommendations for assessment of measurement uncertainty has been carried out.

KEYWORDS: PH-METER, PH-ELECTRODE, ACIDITY MEASUREMENT, CALIBRATION, UNCERTAINTY OF MEASUREMENT

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	7
Вступ	8
РОЗДІЛ 1. ОСОБЛИВОСТІ ВИМІРЮВАННЯ РІВНЯ pH	13
1.1. Фізико-хімічна природа pH та шкала кислотності	13
1.2 Методи вимірювання pH та огляд існуючих приладів	15
1.3 Постановка завдання на розробку	20
Розділ 2. Вибір та обґрунтування технічних рішень	22
2.1 Проектування структури приладу	22
2.2 Обґрунтування та вибір компонентів вимірювального каналу	26
2.3 Телекомунікаційні функції приладу	32
Розділ 3. Програмна реалізація та особливості калібрування	33
3.1. Розробка алгоритму роботи програмного забезпечення	33
3.2. Налаштування середовища та розробка програмного скетчу	37
3.3. Особливості методики калібрування РН-метру	42
Висновки	47
Список використаних джерел	48

					ДП.МТІР.1158276.00.00.00.000 ПЗ				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Портативний прилад вимірювання рівня рН у рідинах / <u>Portable pH meter for liquids</u>	Літ.	Арк.	Акрушів	
Розроб.		Яцина Л.В.							
Перевірів.		Масляк Б.О.					6	69	
Консульт.						ЗУНУ. ФКІТ. МТІРЗ-41/1			
Н. Контр.		Масляк Б.О							
Затверд.		Сегін А.І.							

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

МК – мікроконтролер;

ВК – вимірювальний канал

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

ЦАП – цифро - аналоговий перетворювач

ПЗ – програмне забезпечення

					ДП.МТІР.1158276.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Контроль кислотно-лужного балансу рідких середовищ є фундаментально важливим у широкому спектрі галузей — від агропромислового комплексу, харчової промисловості та медицини до екологічного моніторингу й хімічного виробництва. Показник рН, що відображає активність іонів водню у розчині, безпосередньо обумовлює якість питної води, ефективність технологічних процесів та безпечність харчових і фармацевтичних продуктів.

За даними аналітичних агентств, світовий ринок рН-метрів оцінювався у 1,09 млрд доларів США у 2024 році та прогнозується до зростання до 1,64 млрд доларів до 2034 року зі щорічним темпом зростання близько 4,17%. Сегмент портативних приладів демонструє найвищий темп розширення ринку, оскільки попит на оперативні вимірювання безпосередньо на місці відбору проб невідмінно зростає в умовах цифровізації промисловості та посилення екологічних регуляторних вимог.

Попри наявність широкого асортименту комерційних рішень, більшість з них або характеризуються значною вартістю, або не забезпечують оптимального поєднання точності, зручності використання та автономності живлення. Зазначені обставини обумовлюють актуальність розроблення власного портативного приладу для вимірювання рівня рН у рідинах, що поєднуюватиме метрологічну надійність із доступністю та компактністю [1, 3].

Мета і завдання роботи. Метою бакалаврської роботи є проектування та практична реалізація портативного цифрового приладу для вимірювання рівня рН у рідинах, що відповідає сучасним вимогам щодо точності вимірювань, зручності експлуатації та автономності живлення.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1) провести аналітичний огляд існуючих методів і засобів вимірювання рівня рН у рідинах та виявити їхні переваги й недоліки;

					ДП.МТІР.1158276.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		8

2) дослідити сучасний стан розвитку сенсорних технологій для рН-вимірювань, зокрема електрохімічних електродів та ISFET-перетворювачів;

3) обґрунтувати вибір елементної бази приладу — мікроконтролера, первинного перетворювача, підсилювального тракту, засобів відображення та джерела живлення;

4) розробити принципову електричну схему та конструктивне виконання портативного рН-метра;

5) реалізувати програмне забезпечення мікроконтролера для обробки сигналу сенсора, автоматичної температурної компенсації та відображення результатів;

6) вивчити питання метрологічного калібрування дослідити процес вимірювання з метою оцінки похибок та невизначеності;

7) сформулювати висновки та рекомендації щодо подальшого вдосконалення розробленого приладу.

Об'єкт та предмет дослідження. Об'єктом дослідження є процес електрохімічного вимірювання рівня рН у рідких середовищах на основі потенціометричного перетворення концентрації іонів водню на електричний сигнал.

Предметом дослідження є структура, схемотехнічні рішення та програмне забезпечення портативного приладу вимірювання рівня рН у рідинах на основі мікроконтролерної платформи.

Методи дослідження. У роботі застосовуються такі методи:

— теоретичний аналіз і синтез — для вивчення фізико-хімічних основ рН-вимірювань та систематизації існуючих технічних рішень;

— потенціометричний метод вимірювань — як основний спосіб перетворення концентрації іонів водню на електричний сигнал;

— схемотехнічне моделювання — для розроблення та верифікації аналогового тракту обробки сигналу;

					ДП.МТІР.1158276.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

— програмування мікроконтролерів — для реалізації алгоритмів обробки даних, температурної компенсації за рівнянням Нернста та користувацького інтерфейсу;

— метрологічне калібрування — для встановлення точності й відтворюваності результатів із застосуванням атестованих буферних розчинів;

— порівняльний аналіз — для оцінки характеристик розробленого приладу відносно існуючих комерційних аналогів.

Наукова новизна та практична цінність роботи. Наукова новизна роботи полягає у розробленні схемотехнічного рішення портативного рН-метра, що забезпечує поєднання високої точності вимірювань ($\pm 0,01$ рН) з мінімальним енергоспоживанням завдяки застосуванню малопотужного мікроконтролера та авторського алгоритму динамічної температурної компенсації на базі рівняння Нернста. На відміну від більшості доступних розробок, у роботі пропонується підхід до адаптивного налаштування коефіцієнта чутливості вимірювального тракту залежно від типу електрода, що підвищує метрологічну надійність приладу в умовах змінної температури середовища.

Практична цінність роботи визначається можливістю безпосереднього застосування розробленого приладу в аналітичних лабораторіях, сільськогосподарських підприємствах для контролю якості ґрунтів та зрошувальних вод, у харчовій і фармацевтичній промисловості для моніторингу технологічних процесів, а також у системах контролю якості питної води. Собівартість розробленого зразка суттєво нижча порівняно з комерційними аналогами відповідного класу точності, що визначає його привабливість для впровадження на малих підприємствах та в освітніх закладах.

Останні роки ознаменувалися суттєвим технологічним поступом у галузі вимірювання рН. Широкого визнання набувають ISFET-сенсори (іон-чутливі польові транзистори), які завдяки сумісності з КМОП-технологією, малому енергоспоживанню та відмінним можливостям мініатюризації розглядаються як перспективна альтернатива класичним скляним електродам. Дослідницький інститут Fraunhofer IPMS у 2024–2025 роках досяг значних результатів у

					ДП.МТІР.1158276.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		10

мінімізації керуючої електроніки для ISFET: нові аналогові схеми споживають менше 1,3 мВт і забезпечують однозонне калібрування завдяки надзвичайно малому дрейфу сенсора, а наступним кроком є зменшення площі чипа до менш ніж 1 мм².

Паралельно активно розвиваються методи компенсації дрейфу сенсорів на основі машинного навчання. У 2024 р. Kim та Cho запропонували платформу на базі CTF-MOSFET (charge-trap-flash) з програмованим коефіцієнтом підсилення чутливості, що долає обмеження класичного ліміту Нернста (59,16 мВ/рН). Застосування рекурентних нейронних мереж і алгоритму XGBoost для корекції температурного та часового дрейфу ISFET-сенсорів дозволяє суттєво підвищити стабільність показань за нестационарних умов вимірювань.

На комерційному ринку у 2024–2025 роках з'явилися нові моделі портативних рН-метрів з бездротовим підключенням та IoT-інтеграцією: Delta OHM HD2103.0 для промислових застосувань, OAKTON ecoTestr pH2 із захищеним від вологи корпусом для польових умов, а також нова лінійка Hanna Instruments для аграрного та екологічного моніторингу. У вересні 2025 року компанія Yokogawa Electric представила цифровий рН-метр із вбудованою системою штучного інтелекту для аналізу даних і прогнозованого технічного обслуговування. Зазначені тенденції до інтелектуалізації, мінімізації та підвищення точності портативних вимірювальних засобів підтверджують актуальність і своєчасність даної роботи.

					ДП.МТІР.1158276.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		11

1. ОСОБЛИВОСТІ ВИМІРЮВАННЯ РІВНЯ pH

1.1. Фізико-хімічна природа pH та шкала кислотності

Поняття pH є фундаментальним у хімії, біохімії та суміжних прикладних науках. Воно характеризує ступінь кислотності або лужності водного розчину через концентрацію іонів водню. Щоб зрозуміти, чому цей показник настільки важливий, варто спочатку розглянути процес дисоціації води. Чиста вода не є абсолютно нейтральним середовищем у абсолютному розумінні: вона самодисоціює на іони за рівнянням:



Добуток концентрацій цих іонів за температури 25 °C є сталою величиною — іонним добутком води:

$$K_w = [\text{H}^+] \cdot [\text{OH}^-] = 1,0 \cdot 10^{-14} \text{ (моль/л)}^2$$

Для чистої води $[\text{H}^+] = [\text{OH}^-] = 10^{-7}$ моль/л. Оскільки концентрація іонів H^+ може змінюватися в дуже широкому діапазоні — від 1 моль/л у сильних кислотах до 10^{-14} моль/л у сильних лугах — для зручності у 1909 році датський хімік Серен Пааборн Серенсен (Søren Peter Lauritz Sørensen) запропонував логарифмічну шкалу [1]:

$$\text{pH} = -\lg [\text{H}^+]$$

Аналогічно визначається показник лужності:

$$\text{pOH} = -\lg [\text{OH}^-]$$

Оскільки $K_w = 10^{-14}$, завжди виконується співвідношення:

$$\text{pH} + \text{pOH} = 14$$

Шкала pH охоплює значення від 0 до 14, хоча в концентрованих розчинах сильних кислот або лугів ці межі можуть виходити за вказаний діапазон. Значення $\text{pH} = 7$ відповідає нейтральному розчину (за температури 25 °C), $\text{pH} < 7$ — кислому, $\text{pH} > 7$ — лужному [1].

					ДП.МТІР.1158276.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		12



Рисунок 1.1 – Шкала рН з прикладами речовин

З практичної точки зору логарифмічна природа шкали означає, що кожна одиниця рН відповідає десятикратній зміні концентрації іонів H^+ . Наприклад, розчин з $pH = 3$ є в 10 разів кислішим, ніж розчин з $pH = 4$, і в 100 разів кислішим, ніж розчин з $pH = 5$.

Температурна залежність рН є важливим практичним аспектом. Іонний добуток K_w змінюється з температурою: при $37\text{ }^\circ\text{C}$ (температура тіла) нейтральне значення становить приблизно $pH = 6,8$, а не $7,0$. Тому коректні вимірювання завжди супроводжуються температурною компенсацією. Рівняння Нернста, яке лежить в основі роботи електрохімічних сенсорів рН, описує залежність електродного потенціалу від концентрації іонів:

$$E = E^0 + (RT / nF) \cdot \ln[H^+]$$

де E — електродний потенціал (В);

E^0 — стандартний потенціал (В);

$R = 8,314\text{ Дж/(моль}\cdot\text{К)}$ — газова стала;

T — температура (К); $n = 1$ (для H^+);

$F = 96\,485\text{ Кл/моль}$ — стала Фарадея.

Підставляючи числові значення та переходячи до десяткового логарифму, для $25\text{ }^\circ\text{C}$ отримуємо:

$$E = E^0 - 0,05916 \cdot pH$$

Чутливість (нахил характеристики) складає $-59,16\text{ мВ/рН}$ при $25\text{ }^\circ\text{C}$. Це так звана нернстівська чутливість — ідеальне значення, яке слугує еталоном якості реального сенсора.

Вимірювання рН має практичне значення у надзвичайно широкому спектрі галузей. Розглянемо найважливіші з них.

					ДП.МТІР.1158276.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		13

Медицина та клінічна діагностика. Кисотно-лужний баланс крові людини підтримується у вузькому діапазоні рН 7,35–7,45. Відхилення від цього діапазону призводять до ацидозу (рН < 7,35) або алкалозу (рН > 7,45), що є небезпечними для життя станами [2]. Шлунковий сік має рН 1,5–3,5, сеча — 4,5–8,0, слина — 6,3–6,8. Моніторинг цих показників є важливим діагностичним інструментом.

Харчова промисловість. рН безпосередньо впливає на смак, колір, текстуру та безпечність харчових продуктів. Виробництво сирів, йогуртів, вин, пива, соків, консервів, м'ясних виробів — у всіх цих процесах контроль рН є обов'язковим. Наприклад, при виробництві йогурту рН ферментації знижується з 6,7 до 4,6–4,2, що сигналізує про завершення процесу [3].

Аквакультура та рибництво. Риби та водні організми надзвичайно чутливі до зміни рН. Для більшості прісноводних видів оптимальний рН становить 6,5–8,5. Відхилення за ці межі спричиняє стрес, порушення дихання та загибель. Тому безперервний моніторинг рН у рибних господарствах є виробничою необхідністю.

Агрохімія та ґрунтознавство. рН ґрунту визначає доступність поживних речовин для рослин. Більшість культур добре розвивається при рН 6,0–7,0. При зниженні рН до 5,0 і нижче підвищується рухливість токсичних іонів алюмінію та марганцю, що пригнічує ріст рослин. Вапнування — поширений агротехнічний захід — базується саме на корекції рН ґрунту.

Екологічний моніторинг. рН водойм є ключовим індикатором їх екологічного стану. Кислотні дощі, скиди промислових підприємств, евтрофікація — всі ці процеси призводять до зміни рН природних водойм. Нормальний рН річкової води становить 6,5–8,5 [4].

Фармацевтична промисловість. Стабільність, ефективність та безпечність лікарських засобів критично залежать від рН розчинів. Ін'єкційні препарати повинні мати рН, максимально наближений до 7,4 (рН крові). рН також визначає ступінь іонізації діючих речовин і, відповідно, їх біодоступність.

					ДП.МТІР.1158276.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		14

Хімічна та нафтопереробна промисловість. Контроль рН технологічних розчинів є обов'язковим для забезпечення вибіркового хімічних реакцій, запобігання корозії обладнання та підтримання якості кінцевих продуктів.

1.2. Методи вимірювання рН та огляд існуючих приладів

Усі відомі методи вимірювання рН можна розділити на чотири основні групи: колориметричні, електрохімічні (потенціометричні), напівпровідникові та оптичні. Кожен із них має власну фізичну основу, переваги і недоліки [1, 4-6].

Колориметричний метод ґрунтується на здатності деяких органічних сполук — кислотно-основних індикаторів — змінювати своє забарвлення залежно від рН середовища. Найпоширенішим практичним втіленням цього методу є індикаторні смужки. Індикатор являє собою слабку кислоту HInd або слабку основу, у якій молекулярна (HInd) та іонізована (Ind⁻) форми мають різні кольори. Рівновага між формами описується константою дисоціації:

$$K_a = [H^+] \cdot [Ind^-] / [HInd]$$

Візуальне перетворення кольору відбувається у діапазоні $pH = pK_a \pm 1$. Для розширення діапазону вимірювання сучасні індикаторні смужки містять суміш декількох індикаторів з різними значеннями pK_a .

Переваги методу: простота, дешевизна, не потребує живлення, результат отримується миттєво. Недоліки: низька точність ($\pm 0,5$ – $1,0$ рН), суб'єктивність візуальної оцінки, неможливість застосування для пофарбованих або каламутних розчинів, одноразовість використання.

Потенціометричний метод є найточнішим та найпоширенішим способом вимірювання рН у лабораторних і промислових умовах. Метод базується на вимірюванні напруги між індикаторним та опорним електродами, зануреними в досліджуваній розчин. Складений електрод вважається стандартним у рН-метрії.

Складений електрод складається з тонкостінної скляної кульки або циліндра з особливого рН-чутливого скла (зазвичай літій-силікатного або натрій-

					ДП.МТІР.1158276.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		15

силікатного складу), заповненої буферним розчином із відомим рН та занурена у нього внутрішня напівелемент Ag/AgCl. Будова електрода показана на рисунку 1.2. Механізм роботи заснований на формуванні потенціалу на межі розподілу "скляна мембрана – розчин" за рахунок обміну іонами між гідратованим шаром скла та досліджуваним розчином. Еквівалентна схема електрода включає два потенціали на зовнішній та внутрішній поверхнях мембрани, а також омичний опір скла (зазвичай 10–500 МОм).

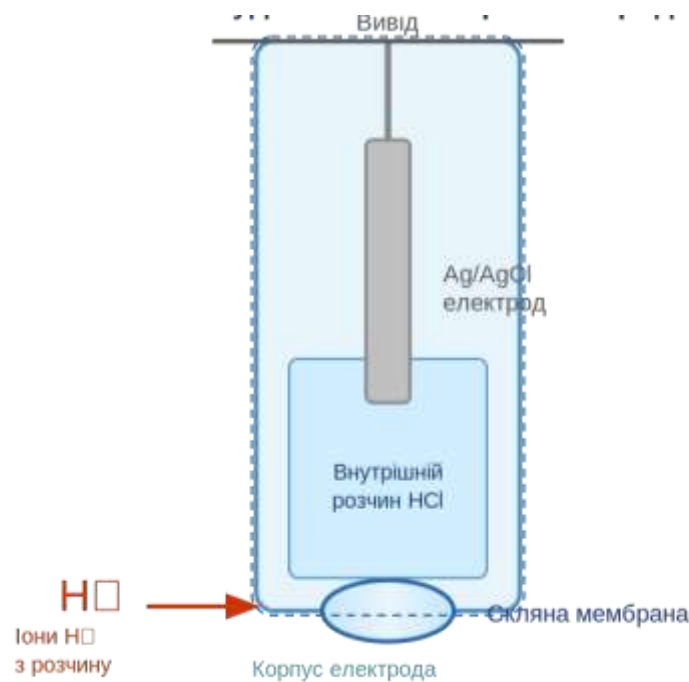


Рисунок 1.2 – Будова скляного рН-електрода

Саме цей надзвичайно великий вхідний опір є ключовою вимогою до вхідного підсилювача схеми вимірювання: він повинен бути щонайменше на два-три порядки вищим, тобто не менше 10^{12} Ом. Загальна ЕРС вимірювального ланцюга описується формулою Нернста. Точна залежність ЕРС від рН для реального скляного електрода:

$$E = K - S \cdot \text{pH}$$

де K — константа, що включає потенціал референсного електрода та асиметрії (В);

					ДП.МТІР.1158276.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		16

S — чутливість (нахил), при $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ $S \approx 59,16\text{ мВ/рН}$. Реальний нахил може відрізнятися від ідеального на 1–3 % і визначається калібруванням.

Переваги: висока точність ($\pm 0,01\text{ рН}$), широкий діапазон, добре вивчений метод. Недоліки: крихкість скляного електрода, необхідність зберігання в зволоженому стані, дрейф нуля з часом, велике вхідне навантаження на підсилювач.

ISFET (Ion-Sensitive Field-Effect Transistor — польовий транзистор з іонно-чутливим затвором) — це напівпровідниковий сенсор, у якому металевий затвор звичайного польового транзистора MOSFET замінено рідким електролітом, що контактує з іон-чутливою діелектричною плівкою. Принцип роботи польового транзистора з іонно-чутливим затвором полягає в тому, що іони H^+ адсорбуються на поверхні чутливого діелектрика затвору і змінюють його потенціал, який керує струмом у каналі транзистора. [7]

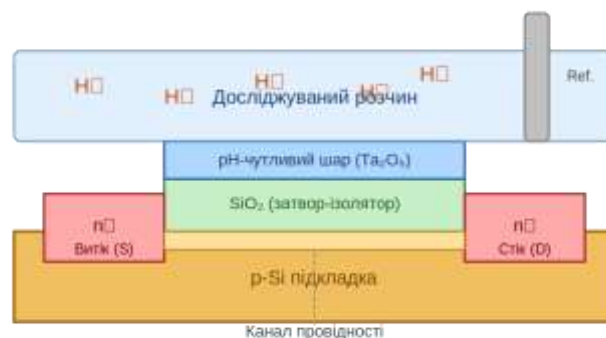


Рисунок 1.3 – Структура ISFET-сенсора

Залежність порогової напруги ISFET від рН визначається виразом:

$$V_T = V_{\text{ref}} - \phi_0 + \text{const}$$

де V_{ref} — потенціал референтного електрода;

ϕ_0 — поверхневий потенціал на межі розділу діелектрик–електроліт, що залежить від рН.

Переваги ISFET: мала маса та розміри, механічна міцність, можливість мікрофабрикації, швидкий відгук ($< 1\text{ с}$), сумісність із КМОН-технологіями.

					ДП.МТІР.1158276.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		17

Недоліки: фотосвітловий дрейф, необхідність референсного електрода, чутливість до завад при роботі у рідких середовищах.

Оптичні методи вимірювання рН набули поширення завдяки відсутності прямого електричного контакту з досліджуваним середовищем, що усуває проблему електромагнітних завад та корозії.

Абсорбційна спектрофотометрія. Метод ґрунтується на вимірюванні поглинання світла рН-чутливим барвником (наприклад, крезоловим червоним, феноловим червоним) при двох довжинах хвиль: одна відповідає ізобестичній точці (незалежній від рН), інша — рН-залежному максимуму. Відношення оптичних густин при цих довжинах хвиль однозначно пов'язане з рН.

Флуоресцентні оптоди. Флуоресцентні рН-чутливі барвники (SNARF, BCECF, флуоресцеїн) змінюють свою інтенсивність флуоресценції або спектральний зсув залежно від рН. Вимірювання можна проводити у мікрооб'ємах (до нл), що важливо для біологічних досліджень. Переваги: відсутність електричного контакту з середовищем, можливість дистанційного вимірювання, мікромасштабність. Недоліки: висока вартість обладнання, вигорання барвника, залежність від кольору та каламутності розчину.

Сучасний ринок рН-метрів охоплює широкий спектр приладів — від простих карманих моделей до мультифункціональних лабораторних систем. Розглянемо три основні категорії.

Лабораторні рН-метри. Провідними виробниками є Hanna Instruments (серії HI2020, HI5221), Mettler Toledo (S220, Seven Excellence), Sartorius, Thermo Scientific. Ці прилади забезпечують точність $\pm 0,001$ – $0,002$ рН, автоматичну температурну компенсацію (АТС), пам'ять для збереження результатів вимірювань, підключення до ПК через USB/RS232. Вони оснащені якісними скляними комбінованими електродами та великими рідкокристалічними дисплеями.

Портативні рН-метри промислового виробництва. Прикладами є Hanna HI98130, HI9813, Milwaukee MW100, YSI ProQuatro. Ці прилади розраховані на польове застосування: мають захищений корпус (IP65/IP67), автономне

					ДП.МТІР.1158276.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		18

живлення від батарей або акумуляторів, вбудовані термометри, компактні розміри. Точність — $\pm 0,05\text{--}0,1$ рН. Окремі моделі підтримують Bluetooth для передачі даних на смартфон.

DIY-рішення на базі Arduino/Raspberry Pi. У спільноті любителів електроніки та в навчальних закладах широко застосовуються саморобні рН-метри на базі відкритих мікроконтролерних платформ. Типова схема: аналоговий модуль рН-сенсора (наприклад, DFRobot SEN0161) → АЦП Arduino → OLED-дисплей → Serial/Bluetooth. Точність таких рішень зазвичай $\pm 0,1\text{--}0,2$ рН, вони є бюджетними, але потребують ручного калібрування та не мають промислового рівня надійності [10].

У таблиці 1.1 наведено порівняльний аналіз основних характеристик розглянутих приладів.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика рН-метрів різних класів

Характеристика	Лаб. рН-метр	Портативний пром.	DIY Arduino	ISFET-сенсор	Запроп. прилад
Точність (рН)	$\pm 0,001\text{--}0,01$	$\pm 0,05\text{--}0,1$	$\pm 0,1\text{--}0,2$	$\pm 0,02\text{--}0,05$	$\pm 0,05$
Діапазон (рН)	0–14	0–14	0–14	0–14	0–14
Живлення	Мережа	Батареї акумулятор.	USB/батарей	Батареї	Li-ion акумулятор.
BT/Wi-Fi	USB/RS232	Деякі мод.	Додатк. мод.	Рідко	BLE вбудов.
Маса (г)	500–2000	150–300	100–500	< 50	≤ 150
Ціна (USD)	500–3000	100–400	20–80	50–200	~30–50
IP-захист	IP20	IP65–IP67	Немає	Немає	IP54

Аналіз таблиці 1.1 свідчить, що на ринку існує незаповнена ніша між дорогими промисловими портативними приладами та бюджетними DIY-рішеннями без належного рівня точності та захисту. Запропонований прилад орієнтований саме на цю нішу.

1.3. Постановка завдання на розробку

На підставі проведеного огляду та аналізу ринку сформульовано технічне завдання на розробку портативного рН-метра. Пристрій повинен задовольняти такі вимоги. Метрологічні вимоги. Діапазон вимірювання рН — 0–14. Основна похибка — не більше $\pm 0,05$ рН. Роздільна здатність відображення — 0,01 рН. Час встановлення показань — не більше 5 с. Автоматична температурна компенсація в діапазоні 0–50 °С.

Вимоги до живлення та енергоспоживання. Автономне живлення від вбудованого акумулятора ємністю не менше 1000 мАг (Li-ion 3,7 В). Час безперервної роботи — не менше 8 годин. Зарядка через стандартний порт micro-USB або USB-C.

Вимоги до інтерфейсу користувача. Графічний або символічний дисплей для відображення поточного значення рН, температури та рівня заряду акумулятора. Мінімум дві кнопки керування (увімкнення/вимкнення, калібрування). Підсвічування дисплея.

Вимоги до передачі даних. Вбудований інтерфейс Bluetooth Low Energy (BLE) або Wi-Fi для безпроводної передачі результатів вимірювань. Протокол передачі — стандартний або з відкритою специфікацією.

Таблиця 1.2 – Технічна специфікація розроблюваного приладу

Параметр	Значення
Діапазон вимірювання рН	0,00 – 14,00
Роздільна здатність	0,01 рН
Основна похибка вимірювання	$\pm 0,05$ рН
Діапазон температурної компенсації	0 – 50 °С
Вхідний опір підсилювача	$\geq 10^{12}$ Ом
Тип рН-електрода	Скляний комбінований (BNC-роз'єм)
Мікроконтролер	ESP32 (Xtensa LX6, 240 МГц, BLE+Wi-Fi)
Тип АЦП	Вбудований 12-біт, зовн. 16-біт (ADS1115)

					ДП.МТІР.1158276.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		20

Дисплей	OLED 0,96", 128×64 піксел, I2C
Інтерфейс передачі даних	Bluetooth 4.2 BLE / Wi-Fi 802.11 b/g/n
Тип акумулятора	Li-ion 18650, 3,7 В, 2000 мАг
Час автономної роботи	≥ 12 годин
Зарядний інтерфейс	USB-C, 5 В / 1 А

На підставі аналізу існуючих методів вимірювання рН та огляду ринкових аналогів обґрунтуємо вибір концепції розроблюваного приладу за ключовими напрямками. Вибір методу вимірювання. З чотирьох розглянутих методів для портативного приладу найбільш підходящим є потенціометричний зі скляним електродом. Це пояснюється: 1) найвищою точністю серед доступних методів; 2) широким асортиментом стандартизованих електродів з BNC-роз'ємом; 3) наявністю відпрацьованих методик калібрування; 4) нижчою вартістю у порівнянні з оптичними методами. ISFET-технологія, попри переваги, поки що характеризується вищою вартістю та складністю схеми обробки сигналу для досягнення потрібної точності.

Вибір мікроконтролерної платформи. Мікроконтролер ESP32 обрано як центральний процесор приладу. Обґрунтування: ESP32 поєднує в собі двоядерний процесор Xtensa LX6 з тактовою частотою до 240 МГц, вбудовані модулі Wi-Fi та Bluetooth 4.2 BLE, 12-бітний АЦП (з можливістю розширення зовнішнім 16-бітним ADS1115), достатній обсяг флеш-пам'яті (4 МБ) та SRAM (520 КБ), а також широку підтримку в IDE Arduino та PlatformIO, що скорочує час розробки ПЗ.

Схема аналогового тракту. Ключовою проблемою схемотехніки є узгодження надзвичайно великого вихідного опору скляного електрода (10–500 МОм) з вхідним опором АЦП. Для вирішення цього завдання буде використано операційний підсилювач з надвисоким вхідним опором — INA116 або LMP7721 з вхідним струмом зміщення менше 20 фА (20×10^{-15} А). Схема виконана у конфігурації буферного повторювача напруги з одиничним коефіцієнтом посилення, що забезпечує мінімальне навантаження на електрод.

					ДП.МТІР.1158276.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		21

Для досягнення ступеня захисту IP54 пропонується застосовати силіконові ущільнення в місцях з'єднання частин корпусу та захисні мембрани над кнопками. BNC-роз'єм для електрода розміщується на торці пристрою і закривається захисною кришкою. Обрана концепція дозволяє досягти оптимального балансу між точністю вимірювань, автономністю, функціональністю та вартістю виготовлення, що є ключовими критеріями успішного портативного приладу.

Таким чином, в даному розділі проведено комплексний аналіз фізико-хімічної природи рН та методів його вимірювання, за результатами якого можна зробити такі висновки.

2. ВИБІР ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ

2.1 Проектування структури приладу

Проектування портативного рН-метра базується на створенні трьох взаємопов'язаних структурних рівнів: загальної архітектури приладу, вимірювального тракту та системи цифрового управління. Кожен із цих рівнів виконує свою роль у процесі перетворення хімічних властивостей рідини на зрозумілі для користувача цифрові дані.

Загальна структура визначає фізичну та функціональну схему приладу — від моменту контакту з рідиною до виведення результату. На цьому рівні рН-метр працює як єдина закрита система, головне завдання якої — забезпечити автономність, точність та швидке отримання результату в польових або лабораторних умовах. Функціонування приладу в цілому відбувається за чітким алгоритмом. Усе починається з активації (запуску) вимірювання – рисунок 2.1.

Користувач занурює датчик у досліджувану рідину та натискає кнопку Пуску. З цього моменту прилад переходить із режиму очікування в активний стан. Первинні перетворювачі (електроди) починають генерувати слабкий електричний потенціал, пропорційний активності іонів водню в розчині, а також

					ДП.МТІР.1158276.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		22

фіксувати його температуру. Оскільки хімічні процеси в рідині та на поверхні електрода вимагають певного часу для встановлення рівноваги, прилад не може миттєво видати точний результат. Мікроконтролер постійно аналізує динаміку зміни сигналу. Як тільки коливання значень зменшуються до визначеного мінімуму (наприклад, менше ніж 0,01 рН за 5 секунд), електронна схема фіксує стабілізацію показу [10, 11].



Рисунок 2.1 – Узагальнена структура приладу

У цей момент система генерує внутрішній сигнал «Кінець вимірювання». Цей сигнал є тригером для інших систем: він зупиняє активне опитування датчиків, фіксує поточне значення в оперативній пам'яті та запускає процеси візуалізації та архівації, що захищає результат від випадкових коливань, якщо користувач поворухне прилад.

Вимірювальний канал відповідає за первинне сприйняття, очищення та аналого-цифрове перетворення сигналу. Його головна функція — трансформувати надзвичайно слабкий і чутливий до завад електричний потенціал рН-електрода у цифровий код без втрати точності – рисунок 2.2.

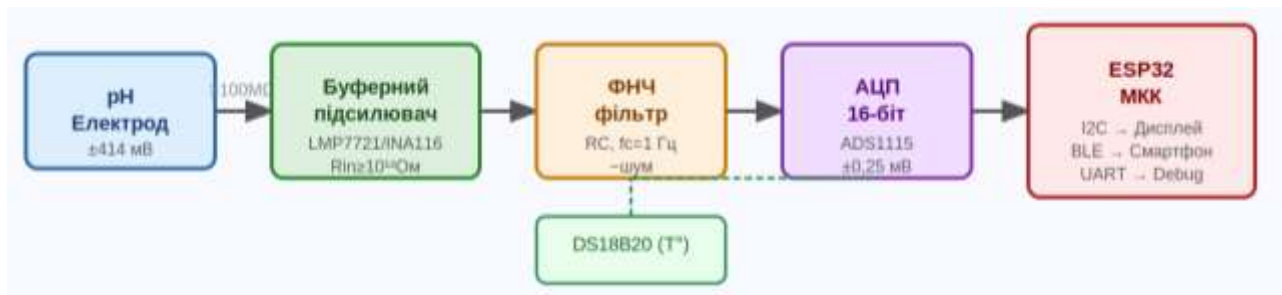


Рисунок 2.2 – Структурна схема аналогового тракту вимірювання

Конкретно для прототипу обрано електрод BNC-compatible pH Combo Electrode (наприклад, серія DFRobot SEN0169-V2 або аналог Atlas Scientific ENV-40-pH). Основні характеристики: діапазон pH 0–14, температурний діапазон 0–60 °C, вихідний потенціал від –414 мВ (pH 0) до +414 мВ (pH 14) із нульовою точкою при 0 мВ (pH 7), опір скляної мембрани 50–300 МОм. Електрод підключається до вимірювальної схеми через стандартний BNC-роз'єм. Центральний провідник BNC несе вимірювальний сигнал (мВ), екран — спільний потенціал (GND).

Безпосередня робота каналу починається з вхідного високоомного повторювача - рисунок 2.2. Оскільки скляний pH-електрод має великий внутрішній опір, будь-яке підключення звичайного підсилювача просто «посадить» сигнал. Повторювач виконує функцію буфера: він має великий вхідний опір, тому акуратно «знімає» напругу з електрода, не спотворюючи її, і передає далі вже зі значно більшою потужністю струму.

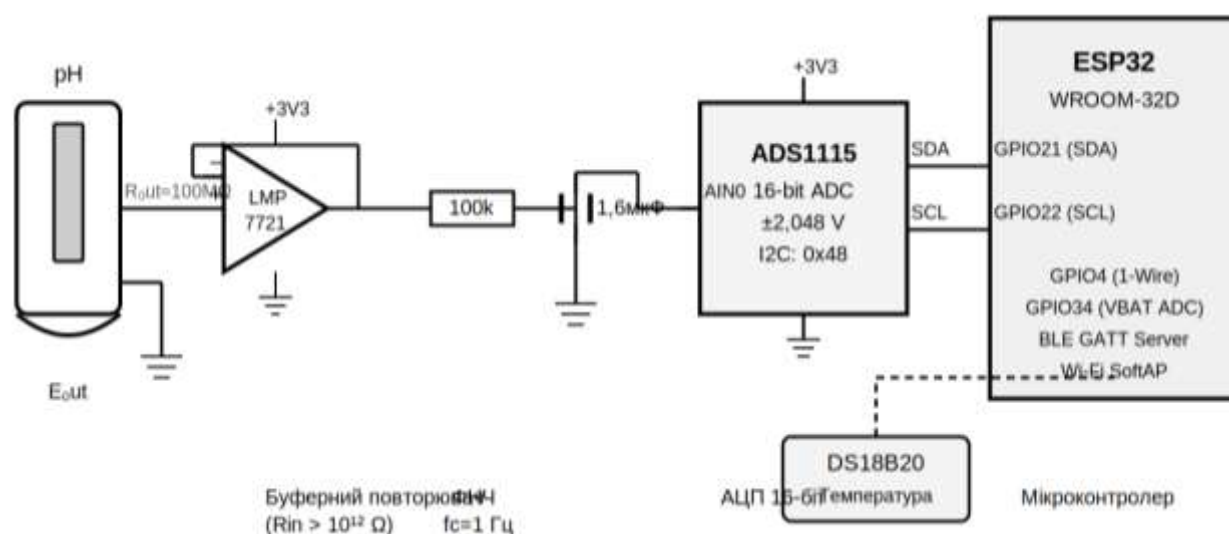


Рисунок 2.3 – Апаратна реалізація вимірювального тракту

Наступним етапом є диференційне посилення та фільтрація. Сигнал очищується від наведених електромагнітних завад (шумів від електромережі, мобільних телефонів, тощо) і масштабується до діапазону, зручного для обробки. Паралельно працює лінія температурної компенсації. Оскільки потенціал рН-електрода залежить від температури рідини (згідно з рівнянням Нернста), канал вимірювання температури безперервно постачає дані про термічний стан проби.

Для узгодження опорів сенсора РН та АЦП необхідний буферний підсилювач – рисунок 2.4 [13, 14].

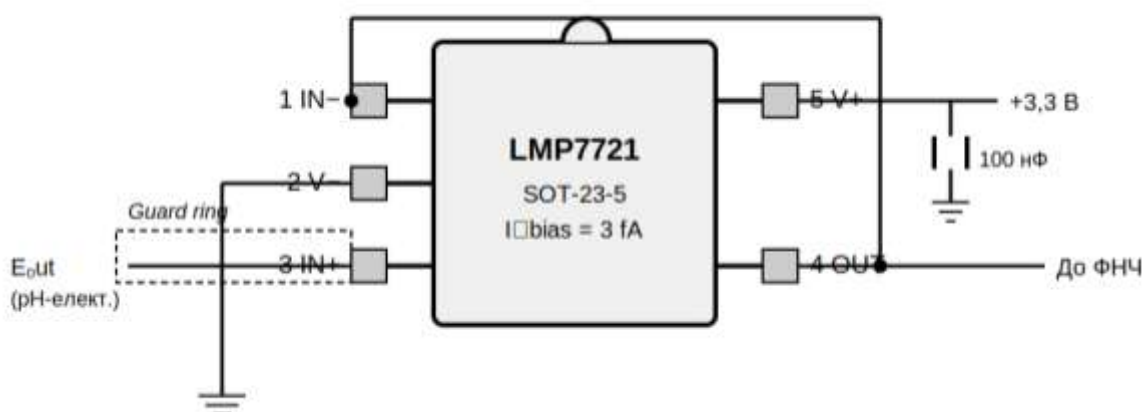


Рисунок 2.4 – Буферний підсилювач

Для цього обрано LMP7721 (Texas Instruments): вхідний струм зміщення 3 фА ($3 \cdot 10^{-15}$ А) — один із найнижчих серед серійних мікросхем; живлення від однополярного джерела 2,7–5,5 В — ідеально поєднується з Li-ion акумулятором. LMP7721 вмикається у конфігурації повторювача напруги (unity-gain buffer): вихід з'єднаний безпосередньо з інвертуючим входом, а вхідний сигнал подається на неінвертуючий вхід. Це забезпечує коефіцієнт підсилення $K = 1$, але трансформує надвисокоомне джерело (~ 100 МОм) у низькоомне ($\sim 0,01$ Ом).

Завершує роботу вимірювального каналу аналого-цифровий перетворювач (АЦП) – рисунок 2.4. Його функція полягає в точному вимірюванні напруги та перетворенні її у цифровий масив даних, який передається на розрахункове ядро мікроконтролера для фінального обчислення значення рН з урахуванням температурної поправки [13, 14].

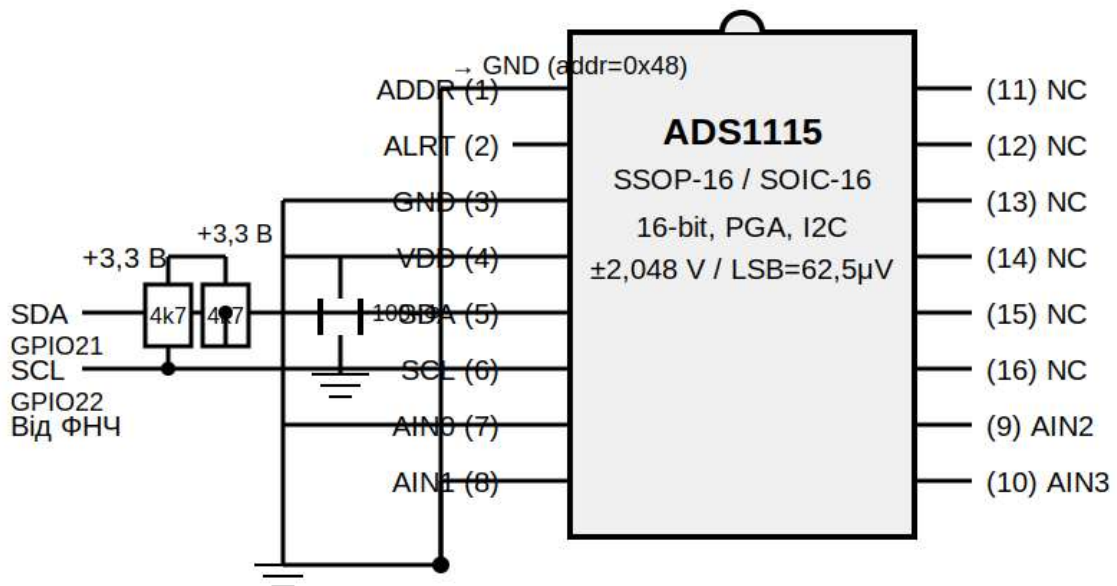


Рисунок 2.4 – Схема використання АЦП

Таким чином, в даному розділі розглянуто структуру приладу та його вимірювальний канал.

2.2 Обґрунтування та вибір компонентів каналу управління

Канал управління виконує роль «мозку» та комунікаційного центру приладу. Він координує роботу всіх вузлів, обробляє команди користувача та відповідає за взаємодію із зовнішнім світом. Однією з ключових функцій цього каналу є управління калібруванням. Перед початком серії вимірювань користувач переводить прилад у режим градуювання. Канал управління розпізнає стандартні буферні розчини, обчислює реальну крутизну

характеристики електрода і записує ці коефіцієнти в енергонезалежну пам'ять. Це дозволяє приладу залишатися точним навіть при поступовому старінні хімічних компонентів датчика.

Окреме завдання каналу управління — візуалізація даних. Отримавши сигнал «Кінець вимірювання», мікроконтролер активує графічний або символний дисплей. На екрані відображається не лише фінальне значення рН великим шрифтом, а й супутні параметри: температура рідини, графічний індикатор стабільності сигналу та рівень заряду батареї. Якщо вимірювання завершено успішно, канал управління може увімкнути підсвітку екрана іншим кольором або вивести піктограму «READY», що є візуальним дублюванням сигналу про закінчення процесу.

Нарешті, канал управління реалізує функцію передачі даних за потреби. Портативний прилад може працювати автономно, зберігаючи результати у внутрішній flash-пам'яті (функція даталоггера). Проте, за командою користувача або при підключенні до зовнішнього пристрою, активуються комунікаційні інтерфейси (наприклад, Bluetooth низького енергоспоживання або USB-порт). Канал управління пакує збережені вимірювання (значення рН, температуру, дату і час) у стандартний протокол обміну і передає їх на смартфон, планшет або комп'ютер для подальшого аналізу чи формування звітів у лабораторії.

Основою каналу управління портативним приладом є мікроконтролерна платформа – таблиця 2.1. Розглянемо три популярні платформи: ATmega328P (Arduino Uno/Nano) — класичний 8-бітний мікроконтролер AVR архітектури. Має тактову частоту 16 МГц, 32 КБ Flash, 2 КБ SRAM. Переваги: простота програмування, величезна спільнота, мала вартість (~1–2 USD). Серйозний недолік для даного проекту — повна відсутність вбудованого BLE та Wi-Fi. Додавання цих функцій потребує окремих модулів (HC-05/ESP01), що ускладнює схему та збільшує споживання [15-17].

STM32F4 (ARM Cortex-M4) — 32-бітний мікроконтролер з ядром ARM Cortex-M4F та тактовою частотою до 168 МГц. Вирізняється широкими обчислювальними можливостями, точним вбудованим АЦП (12 біт), великим

					ДП.МТІР.1158276.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		27

обсягом пам'яті. Але також не має вбудованого бездротового зв'язку, а вартість значно вища (~4–10 USD). Ідеальний вибір для промислових приладів без вимог до бездротового зв'язку.

ESP32 (Xtensa LX6) — двоядерний 32-бітний мікроконтролер з тактовою частотою до 240 МГц, який поєднує в одному корпусі повноцінний Wi-Fi 802.11 b/g/n та Bluetooth 4.2 (Classic + BLE). Має 4 МБ Flash, 520 КБ SRAM, 12-бітний АЦП, апаратні інтерфейси I2C, SPI, UART, Touch-sensor. Вартість модуля ESP32-WROOM-32 близько 3–4 USD.

Таблиця 2.1 – Детальне порівняння мікроконтролерних платформ

Критерій	ATmega328P	STM32F4xx	ESP32
Архітектура	8-біт AVR	32-біт ARM M4	32-біт Xtensa LX6
Частота	16 МГц	168 МГц	240 МГц (2 ядра)
Flash / SRAM	32 / 2 КБ	512 / 192 КБ	4096 / 520 КБ
Wi-Fi	Ні	Ні	802.11 b/g/n
Bluetooth	Ні	Ні	BLE 4.2 + Classic
Вбудований АЦП	10 біт	12 біт	12 біт (нелін.)
I2C / SPI / UART	1/1/1	3/3/6	2/4/3
Режим Deep Sleep	так	так	так (10 мкА)
Вартість (USD)	~1–2	~4–10	~3–4
IDE	Arduino	STM32CubeIDE	Arduino/PlatformIO
Спільнота	Велика	Середня	Дуже велика
Оцінка для проекту	3/5	4/5	5/5

В результаті аналізу ESP32 обрано як оптимальний мікроконтролер для даного приладу. Вирішальними аргументами є: наявність вбудованих модулів Wi-Fi та BLE — ключових функцій технічного завдання — без потреби у зовнішніх модулях; достатня обчислювальна потужність для одночасної роботи з АЦП, дисплеєм та BLE-стеком; підтримка режиму глибокого сну з споживанням ~10 мкА, що критично для автономного приладу; широка

підтримка у спільноті та наявність готових бібліотек для ADS1115, SSD1306, DS18B20; прийнятна вартість.

Конкретно обрано модуль ESP32-WROOM-32D з 4 МБ Flash та вбудованою антеною – рисунок 2.5. Периферія: АЦП, I2C, UART, BLE/Wi-Fi.

Вибір дисплея для портативного приладу визначається трьома головними критеріями: розбірливість при яскравому сонячному освітленні, мале споживання струму та компактний розмір. Розглянемо три основні варіанти.

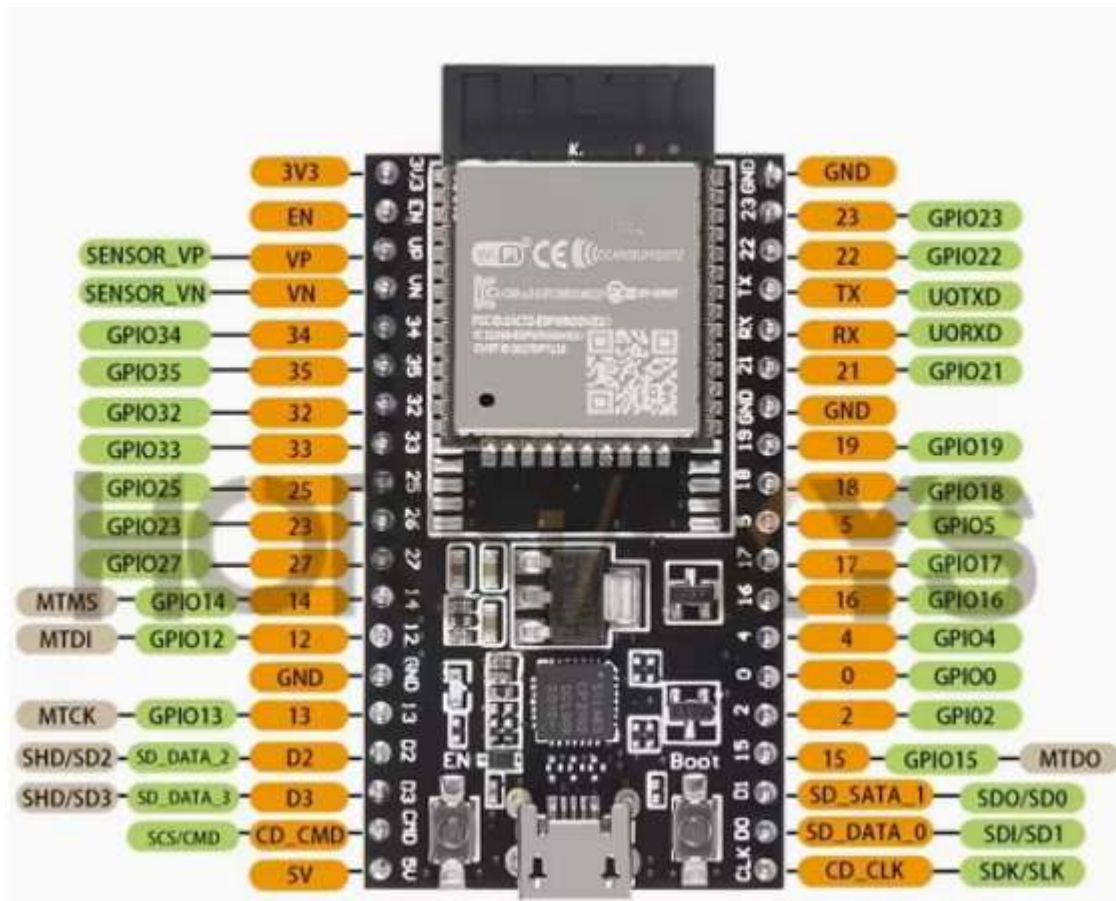


Рисунок 2.5 – Вид та призначення виводів ESP32

LCD 1602 (16 символів × 2 рядки) — класичний рідкокристалічний дисплей на базі контролера HD44780. Підключається через 4-бітний паралельний або I2C (з модулем PCF8574) інтерфейс. Споживання з підсвічуванням: ~25–35 мА (без підсвічування ~1 мА). Серйозний недолік — погана читабельність при яскравому зовнішньому освітленні без підсвічування; малий інформаційний простір (лише 32 символи ASCII).

OLED 0,96" (128×64 пікселів) на базі контролера SSD1306 — органічний світлодіодний дисплей, у якому кожен піксель є незалежним джерелом світла. Це забезпечує відмінний контраст (10000:1) та читабельність у будь-яких умовах освітлення, включаючи пряме сонячне. Споживання залежить від кількості увімкнених пікселів: при типовому режимі відображення рН 4–8 мА. Підключається через I2C або SPI.

Кольоровий TFT 1,8" (128×160 або 240×320) на базі ST7735/ILI9341 — повнокольоровий дисплей з яскравим зображенням та широким кутом огляду. Однак TFT-дисплеї мають суттєвий недолік: вони погано читаються при яскравому сонці (підсвічування з'їдається відблесками), і споживають значно більше струму (50–80 мА), що скорочує час автономної роботи.

Таблиця 2.2 – Порівняння дисплеїв для портативного рН-метра

Параметр	LCD 1602	OLED 0,96"	TFT 1,8"
Роздільна здатн.	16×2 симв.	128×64 пкс	128×160 пкс
Колір	Моно	Моно / колір	16-біт колір
Споживання	25–35 мА	4–8 мА	50–80 мА
Читабельність на сонці	Погана	Відмінна	Задовільна
Інтерфейс	I2C (PCF8574)	I2C / SPI	SPI
Напруга живлення	5 В	3,3 В	3,3 В
Вартість	~0,8 USD	~2–3 USD	~4–6 USD
Оцінка	3/5	5/5	3/5

В результаті аналізу обрано OLED-дисплей 0,96" (128×64 пікс.) SSD1306 на інтерфейсі I2C – рисунок 2.6.



Рисунок 2.6 - OLED-дисплей SSD1306

Схема підключення OLED SSD1306 до ESP32 показана на рисунку 2.7.

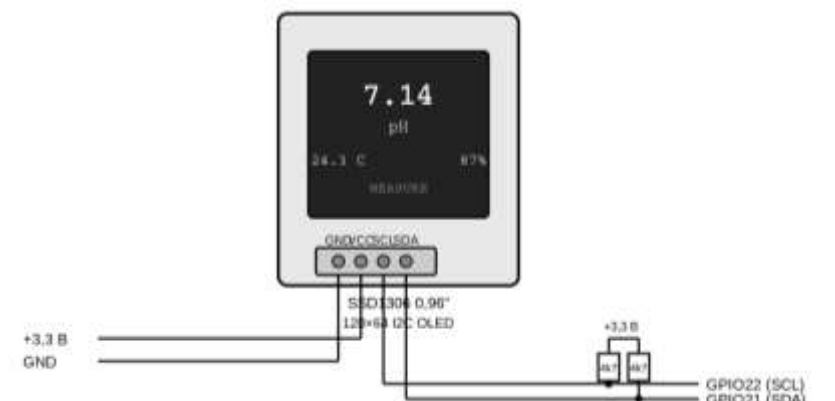


Рисунок 2.7 – Зовнішній вигляд OLED SSD1306 та принципова схема підключення до ESP32

Схема підключення: VCC → 3,3 В; GND → GND; SDA → GPIO21 (ESP32); SCL → GPIO22 (ESP32). Підтягувальні резистори SDA/SCL — 4,7 кОм до 3,3 В. Адреса I2C: 0x3C (при ADDR → GND). На дисплеї одночасно відображається: велике значення рН (шрифт 24 пт), температура (12 пт), піктограма рівня заряду (custom bitmap), режим («ВИМІР» / «КАЛІБ.»).

Таким чином, в даному розділі розглянуті питання побудови цифрового каналу управління портативним рН-метром.

2.3 Телекомунікаційні функції приладу

Модуль ESP32-WROOM-32D відзначається універсальністю завдяки одночасній підтримці технологій Wi-Fi та Bluetooth Low Energy, що робить його чудовим вибором для побудови комунікаційних каналів портативного рН-метра. Вбудований безпроводовий радіомодуль дозволяє гнучко адаптувати прилад до різних умов експлуатації залежно від наявного інфраструктурного оточення.

При використанні Wi-Fi прилад здатний працювати у кількох режимах. У режимі станції рН-метр інтегрується в існуючу локальну чи лабораторну мережу на правах звичайного клієнта, завдяки чому він може надсилати накопичені результати аналізів на віддалений сервер або у хмарне сховище за допомогою поширених мережових протоколів. Якщо ж вимірювання проводяться в польових умовах, де зовнішня мережа відсутня, мікроконтролер активує режим точки доступу. У цьому стані модуль самостійно створює безпроводову мережу, до якої користувач підключає свій смартфон для перегляду результатів через розгорнуту всередині приладу веб-сторінку. Для складних сценаріїв архітектура модуля дозволяє поєднувати ці режими та використовувати їх одночасно.

Для безпосередньої взаємодії з мобільними додатками пріоритетним є використання технології Bluetooth Low Energy, оскільки вона забезпечує мінімальне навантаження на акумулятор портативного приладу. У такій мережі мікроконтролер виконує роль сервера, який транслює у простір унікальний ідентифікатор пристрою та структурує дані у вигляді окремих сервісів і характеристик. Мобільний додаток виступає клієнтом, який підключається до системи та підписується на оновлення конкретної характеристики, наприклад, поточного значення рН. Щойно внутрішня логіка приладу фіксує сигнал про закінчення вимірювання, модуль миттєво відправляє push-повідомлення з новими цифрами на екран смартфона, після чого передавач вимикається для збереження енергії.

					ДП.МТІР.1158276.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		32

Процес налаштування середовища розробки Arduino IDE для роботи з цим модулем є послідовним та інтуїтивно зрозумілим. Оскільки базове середовище орієнтоване на плати сімейства Arduino, першим кроком є додавання спеціалізованого посилання на репозиторій розробників у меню налаштувань програми, що відкриває доступ до індексних файлів сторонніх платформ. Після збереження змін розробник відкриває вбудований менеджер плат, знаходить через пошуковий рядок офіційний пакет підтримки від компанії Espressif Systems та запускає його автоматичне встановлення. Цей процес додає в систему всі необхідні компілятори, інструменти прошивки та базові бібліотеки для безпроводового зв'язку. На завершальному етапі залишається лише фізично підключити плату розробника до комп'ютера за допомогою кабелю, відкрити меню інструментів, обрати універсальний профіль плати зі списку платформи ESP32 та вказати активний системний порт, через який здійснюватиметься завантаження коду.

3. ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

3.1. Розробка алгоритму роботи програмного забезпечення

Програмне забезпечення портативного рН-метру на базі мікроконтролера ESP32 виконує кілька взаємопов'язаних функцій: збір аналогових даних з рН-сенсора, цифрове фільтрування сигналу шляхом усереднення вибірок, відображення поточного значення рН на OLED-дисплеї SSD1306, а також передачу результатів вимірювань на віддалений сервер через Wi-Fi за натисканням кнопки. Усі ці функції реалізовані у вигляді чітко структурованого скетчу для Arduino-сумісного середовища, де кожен програмний модуль відповідає за окрему задачу.

Загальний алгоритм роботи приладу можна розподілити на три логічні фази: ініціалізацію, циклічне вимірювання та передачу даних. Фаза ініціалізації

					ДП.МТІР.1158276.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		33

відбувається один раз після подачі живлення і включає налаштування периферійних пристроїв — ADC, OLED-дисплея, кнопки та Wi-Fi-модуля. Циклічна фаза виконується безперервно у головному циклі loop() і забезпечує регулярне отримання рН-значень та їх виведення на дисплей. Фаза передачі даних є подієво-орієнтованою і активується виключно за натисканням апаратної кнопки.

Алгоритм усереднення вимірювань побудований на методі ковзного середнього (sliding window average). Контролер виконує N послідовних зчитувань з аналогово-цифрового перетворювача (АЦП), сумує отримані значення та ділить суму на кількість вимірювань. Типове значення вікна усереднення становить 10–20 вибірок із затримкою 50 мс між ними, що дозволяє відфільтрувати короточасні флуктуації сигналу та знизити вплив електричних завад. Формула усередненого напруги має вигляд:

$$U_{сер} = (1/N) \cdot \sum_{i=1..N} U_i$$

де $U_{сер}$ — усереднена напруга на виході АЦП (В),

U_i — i -е зчитане значення напруги,

N — кількість вибірок у вікні усереднення.

Перетворення усередненого значення напруги у значення рН відбувається згідно з лінійним рівнянням, отриманим у результаті двоточкового калібрування:

$$pH = (U_{сер} - U_7) / S + 7$$

де U_7 — напруга електрода при рН = 7 (нейтральне середовище), S — нахил калібрувальної кривої (чутливість електрода, мВ/рН). Значення U_7 та S зберігаються у постійній пам'яті (NVS або SPIFFS) після процедури калібрування.

Алгоритм відображення даних на дисплеї SSD1306 передбачає оновлення екрана після кожного циклу усереднення. На дисплей виводяться числове

					ДП.МТІР.1158276.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		34

значення pH з точністю до другого знаку після коми, символна індикація кислотності середовища (кисле/нейтральне/лужне), а також позначка Wi-Fi-з'єднання. Бібліотека Adafruit_SSD1306 використовує буферизований вивід: усі операції малювання спочатку вносяться до оперативного буфера, а потім одним викликом `display.display()` передаються на фізичний екран, що виключає мерехтіння зображення.

Алгоритм передачі даних через Wi-Fi активується апаратним перериванням від кнопки. Після підтвердження натискання (апаратне дебаунсування затримкою 50 мс) ESP32 перевіряє стан Wi-Fi-з'єднання. Якщо з'єднання активне, поточне значення pH формується у вигляді HTTP GET або POST запиту і надсилається на попередньо налаштований сервер. У разі відсутності з'єднання прилад відображає повідомлення про помилку на дисплеї та не блокує подальшу роботу.

Нижче наведено код PlantUML для відтворення діаграми алгоритму:

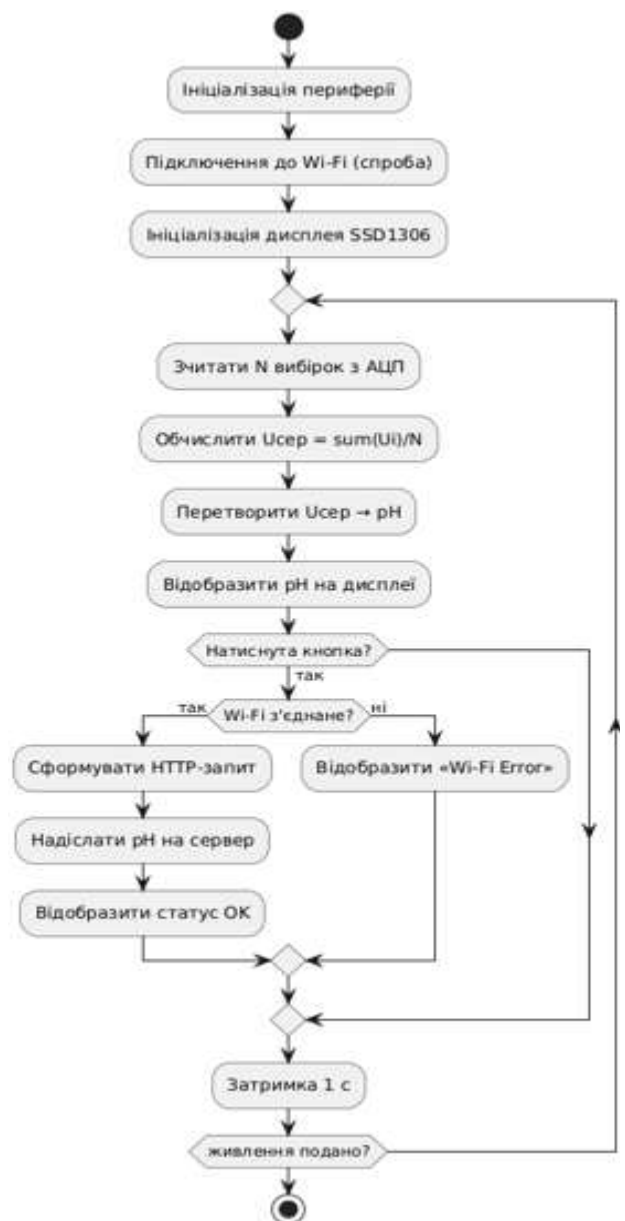
					ДП.МТІР.1158276.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		35

```

|"
@startuml
skinparam monochrome true
skinparam defaultFontName Times New Roman
start
:Ініціалізація периферії;
:Підключення до Wi-Fi (спроба);
:Ініціалізація дисплея SSD1306;
repeat
::Зчитати N вибірок з АЦП;
::Обчислити  $U_{сер} = \sum(U_i) / N$ ;
::Перетворити  $U_{сер} \rightarrow pH$ ;
::Відобразити pH на дисплеї;
::if (Натиснута кнопка?) then (так)
:::if (Wi-Fi з'єднане?) then (так)
:::::Сформувати HTTP-запит;
:::::Надіслати pH на сервер;
:::::Відобразити статус OK;
:::else (ні)
:::::Відобразити «Wi-Fi Error»;
:::endif
::endif
::Затримка 1 с;
repeat while (живлення подано?)
stop
@enduml

```

а)



б)

Рисунок 3.1 - Код PlantUML – а) для побудови діаграми алгоритму – б)

Алгоритм підключення до Wi-Fi реалізований у режимі Station (STA), при якому ESP32 приєднується до існуючої бездротової мережі з попередньо заданими SSID та паролем. З метою запобігання зависанню під час старту передбачений таймаут підключення — якщо протягом 10 секунд з'єднання не встановлено, прилад переходить до режиму автономної роботи, продовжуючи вимірювати та відображати pH без можливості передачі даних. Такий підхід гарантує безвідмовне функціонування навіть у відсутності мережевого доступу.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

Взаємодія між модулями програми побудована за принципом мінімальної залежності: кожна функція вирішує єдину конкретну задачу. Функція `readPH()` відповідає за зчитування та усереднення АЦП, функція `displayPH()` — за оновлення дисплея, а функція `sendToServer()` — за HTTP-комунікацію. Такий поділ відповідальності спрощує налагодження, тестування окремих блоків та подальше розширення функціоналу приладу.

Часові характеристики алгоритму є важливим параметром системи реального часу. Один цикл усереднення з $N = 10$ вибітками та затримкою 50 мс займає не менше 500 мс, після чого відбувається оновлення дисплея (< 10 мс) та перевірка кнопки. Таким чином, мінімальний інтервал оновлення показань становить приблизно 0,5–1 с, що є достатнім для вимірювань рівня рН у більшості практичних застосувань — від аналізу ґрунтових розчинів до контролю харчових середовищ [1, 2].

3.2. Налаштування середовища та розробка програмного скетчу

Для розробки програмного забезпечення мікроконтролера ESP32 обрано середовище Arduino IDE версії 2.x. Цей вибір обґрунтований кількома чинниками. По-перше, Arduino IDE підтримує ESP32 через офіційне ядро Espressif Systems (esp32 by Espressif), що встановлюється через менеджер плат Boards Manager і надає доступ до всіх апаратних ресурсів мікроконтролера. По-друге, Arduino IDE 2.x містить вбудований IntelliSense, відлагоджувач та монітор послідовного порту з пліттером, що значно прискорює розробку. По-третє, широка екосистема Arduino-сумісних бібліотек дозволяє використовувати готові драйвери для OLED-дисплея, HTTP-клієнта та інших компонентів без написання низькорівневого коду [3].

Для роботи з мікроконтролером ESP32 необхідно встановити підтримку платформи через менеджер плат Arduino IDE: у вікні Preferences додати посилання <https://raw.githubusercontent.com/espressif/arduino-esp32/gh->

					ДП.МТІР.1158276.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		37

pages/package_esp32_index.json, після чого у розділі Board Manager встановити пакет «esp32 by Espressif Systems» версії 2.0 або новішої. Це дозволить обирати конкретну модель плати (наприклад, ESP32 Dev Module) та налаштовувати параметри компіляції та завантаження.

Необхідні бібліотеки встановлюються через менеджер бібліотек (Library Manager). Для роботи з OLED-дисплеєм SSD1306 встановлюється пакет «Adafruit SSD1306» разом із залежністю «Adafruit GFX Library». Обидві бібліотеки надають зручний API для малювання тексту, геометричних примітивів та растрових зображень. Для HTTP-з'єднань з сервером використовується вбудована бібліотека WiFi.h та HTTPClient.h, що входять до складу ядра ESP32 і не потребують окремого встановлення. Перелік усіх залежностей наведено у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1. Бібліотеки, використані у програмному скетчі рН-метру

Бібліотека	Призначення	Джерело
Wire.h	I2C-зв'язок з SSD1306	ESP32 core (Espressif)
Adafruit_GFX.h	Графічна основа для дисплея	Adafruit (Library Manager)
Adafruit_SSD1306.h	Драйвер OLED-дисплея	Adafruit (Library Manager)
WiFi.h	Wi-Fi Station підключення	ESP32 core (Espressif)
HTTPClient.h	HTTP GET/POST запити	ESP32 core (Espressif)

Структура програмного скетчу відповідає стандартній архітектурі Arduino: блок глобальних змінних та підключення бібліотек, функція setup() для одноразової ініціалізації, функція loop() для основного циклу, а також набір допоміжних функцій. Нижче наведено повний скетч із детальними коментарями.

Рисунок 3.3 - Фрагмент коду: ініціалізація та підключення бібліотек

```
// === рН-метр на ESP32 + SSD1306 + Wi-Fi ===
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_GFX.h>
#include <Adafruit_SSD1306.h>
```

					ДП.МТІР.1158276.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		38

```

#include <WiFi.h>
#include <HTTPClient.h>

#define SCREEN_WIDTH 128
#define SCREEN_HEIGHT 64
#define OLED_RESET -1
#define PH_PIN 34 // АЦП вхід рН-сенсора
#define BTN_PIN 0 // Кнопка відправки
#define SAMPLES 10 // Кількість вибірок
#define SAMPLE_DELAY 50 // мс між вибірками

const char* ssid = "YOUR_SSID";
const char* password = "YOUR_PASS";
const char* serverURL = "http://192.168.1.100/api/ph";

// Калібрувальні константи
const float V_REF = 3.3; // Vref ESP32 ADC
const float ADC_RES = 4095.0; // 12-bit ADC
const float U7 = 2.5; // Напруга при рН=7
const float S = -0.1775; // мВ/рН (чутливість)

Adafruit_SSD1306 display(SCREEN_WIDTH, SCREEN_HEIGHT,
                          &Wire, OLED_RESET);

float currentPH = 7.0;
bool wifiOK = false;

```

Рисунок 3.4. - Фрагмент коду: функція setup() та ініціалізація пристроїв

```

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  pinMode(BTN_PIN, INPUT_PULLUP);
  analogReadResolution(12); // 12-бітний АЦП ESP32

  // Ініціалізація OLED
  if (!display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3C)) {
    Serial.println("SSD1306 not found!");
    while (true);
  }
}

```

					ДП.МТІР.1158276.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		39

```

}
display.clearDisplay();
display.setTextColor(SSD1306_WHITE);
display.setTextSize(1);
display.setCursor(0,0);
display.println("pH Meter v1.0");
display.display();

// Підключення до Wi-Fi
WiFi.begin(ssid, password);
int tries = 0;
while (WiFi.status() != WL_CONNECTED && tries < 20) {
    delay(500); tries++;
}
wifiOK = (WiFi.status() == WL_CONNECTED);
}

```

Рисунок 3.5. - Фрагмент коду: функція readPH() та main loop()

```

float readPH() {
    long sum = 0;
    for (int i = 0; i < SAMPLES; i++) {
        sum += analogRead(PH_PIN);
        delay(SAMPLE_DELAY);
    }
    float raw = sum / (float)SAMPLES;
    float voltage = raw * V_REF / ADC_RES;
    return (voltage - U7) / S + 7.0;
}

void showPH(float ph) {
    display.clearDisplay();
    display.setTextSize(2);
    display.setCursor(0, 0);
    display.print("pH: ");
    display.println(ph, 2);
    display.setTextSize(1);
    display.setCursor(0, 40);
}

```

					ДП.МТІР.1158276.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		40

```

    if (ph < 7.0) display.print("Acid ");
    else if (ph > 7.0) display.print("Base ");
    else display.print("Neutral");
    if (wifiOK) display.print(" [WiFi]");
    display.display();
}

void sendData(float ph) {
    if (!wifiOK) { return; }
    HTTPClient http;
    String url = String(serverURL) + "?ph=" + String(ph, 2);
    http.begin(url);
    int code = http.GET();
    http.end();
    // Відображення статусу відправки
    display.setCursor(0, 55);
    display.print(code == 200 ? "Sent OK" : "Send ERR");
    display.display();
}

void loop() {
    currentPH = readPH();
    showPH(currentPH);
    if (digitalRead(BTN_PIN) == LOW) {
        delay(50); // дебаунс
        if (digitalRead(BTN_PIN) == LOW) {
            sendData(currentPH);
            while (digitalRead(BTN_PIN) == LOW);
        }
    }
    delay(500);
}

```

Функція readPH() реалізує алгоритм усереднення: у циклі виконується зчитування 10 значень з АЦП з інтервалом 50 мс, після чого обчислюється середнє арифметичне та здійснюється перетворення за формулою (3.2). Функція showPH() відповідає за відображення: вона очищує буфер дисплея, виводить числове значення рН збільшеним шрифтом (TextSize=2) та рядок словесної

					ДП.МТІР.1158276.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		41

класифікації, після чого викликає `display.display()` для фізичного оновлення екрана. Функція `sendData()` перевіряє наявність Wi-Fi-з'єднання, формує URL з параметром pH та виконує HTTP GET запит до сервера.

Ключовим оператором для усереднення є конструкція `sum += analogRead(PH_PIN)` в циклі, яка накопичує суму відліків, та наступний поділ на кількість вибірок. Для конвертації сирого значення АЦП у напругу використовується вираз $\text{voltage} = \text{raw} * V_REF / \text{ADC_RES}$, де значення 3.3 В та 4095 відповідають напрузі живлення та роздільній здатності 12-бітного АЦП ESP32 відповідно. Подальше перетворення у pH виконує рівняння $(\text{voltage} - U_7) / S + 7.0$, де константи U_7 та S визначаються при калібруванні [4, 5].

Середовище Arduino IDE 2.x надає зручний Serial Monitor та Serial Plotter, якими доцільно користуватися під час налагодження. Виведення значень через `Serial.print()` дозволяє в реальному часі спостерігати за сирими значеннями АЦП, обчисленою напругою та отриманим pH, що суттєво прискорює виявлення помилок у калібрувальних константах або проблем із апаратним з'єднанням. Додавання `Serial.printf("ADC: %d, V: %.3f, pH: %.2f\n", rawAvg, voltage, ph)` після кожного циклу вимірювань забезпечує зручне трасування виконання алгоритму.

3.3. Особливості методики калібрування pH-метру

Калібрування є обов'язковою процедурою перед початком роботи з будь-яким pH-метром, оскільки вихідна характеристика скляного електрода є індивідуальною і залежить від ступеня зносу мембрани, температури розчину, тривалості зберігання електрода та інших чинників. Навіть при ідеальному виробництві два pH-електроди ніколи не мають абсолютно однакових параметрів — їх електрохімічна чутливість та нульовий потенціал відрізняються в межах технологічного розкиду. Тому скетч, що реалізує перетворення сигналу, повинен містити механізм оновлення калібрувальних констант U_7 та S без перекомпіляції прошивки.

					ДП.МТІР.1158276.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		42

Фізична основа калібрування пов'язана з рівнянням Нернста, яке описує залежність електрорушійної сили (ЕРС) скляного електрода від концентрації іонів водню:

$$E = E0 - (RT / nF) \cdot \ln[H+]$$

де E — ЕРС електрода (В), E0 — стандартний електродний потенціал (В), R = 8,314 Дж/(моль·К) — універсальна газова стала, T — абсолютна температура (К), n = 1 — число електронів, F = 96485 Кл/моль — стала Фарадея. Оскільки pH = -log[H+], рівняння (3.3) набуває лінійного вигляду:

$$E = E0 + S \cdot pH$$

де S = 2,303 · RT / F — теоретичний нахил характеристики, який при 25 °С становить -59,16 мВ/рН. Знак мінус обумовлений від'ємним зарядом іонів водню. На практиці нахил реального електрода відхиляється від теоретичного на 5–15%, що й зумовлює необхідність калібрування.

У портативному приладі рекомендована процедура двоточкового калібрування з використанням двох стандартних буферних розчинів (рН 4,01 та рН 6,86 або рН 4,01 та рН 9,18). Двоточкове калібрування дозволяє визначити обидва невідомі параметри — E0 та S — одночасно, забезпечуючи значно вищу точність, ніж одноточкове, яке визначає лише зсув характеристики.

Порядок виконання калібрування включає такі кроки. Спочатку електрод ретельно промивається дистильованою водою і просушується фільтрувальним папером. Потім електрод занурюється у перший буферний розчин (рН1 = 4,01) і витримується до стабілізації показань протягом 60–120 секунд. Зчитується усереднене значення напруги U1. Після цього електрод знову промивається, переноситься у другий буфер (рН2 = 6,86 або 9,18) і аналогічно знімається значення U2. Нахил та точка нульового потенціалу розраховуються за системою рівнянь:

$$S = (U2 - U1) / (pH2 - pH1)$$

$$U7 = U1 + S \cdot (7 - pH1)$$

Отримані значення S та U7 записуються у відповідні змінні скетчу або зберігаються у енергонезалежній пам'яті NVS (Non-Volatile Storage)

					ДП.МТІР.1158276.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		43

мікроконтролера ESP32 за допомогою бібліотеки Preferences.h, що дозволяє зберегти калібрувальні дані після вимкнення живлення.

Практичний приклад розрахунку калібрувальних констант. Нехай при зануренні електрода у буфер рН = 4,01 АЦП ESP32 зафіксував усереднену напругу $U_1 = 2,808$ В, а у буфері рН = 6,86 — $U_2 = 2,303$ В. Тоді нахил характеристики за формулою (3.5):

$$S = (2,303 - 2,808) / (6,86 - 4,01) = -0,505 / 2,85 \approx -0,1772 \text{ В/рН}$$

Значення напруги при рН = 7 за формулою (3.6):

$$U_7 = 2,808 + (-0,1772) \cdot (7 - 4,01) \approx 2,808 - 0,530 \approx 2,278 \text{ В}$$

Отримані значення $S \approx -0,177$ В/рН та $U_7 \approx 2,278$ В підставляються у формулу (3.2) для обчислення рН при подальших вимірюваннях. Відхилення нахилу $-0,177$ В/рН від теоретичного $-0,177$ В/рН свідчить про задовільний стан електрода — реальний нахил становить близько 99,7% від теоретичного значення, що відповідає вимогам ДСТУ щодо точності рН-метрів класу А [6].

Важливим фактором є температурна корекція. Нахил характеристики є лінійно залежним від абсолютної температури: $S(T) = -2,303 \cdot R \cdot T / F$. При відхиленні температури від 25 °С на 10 °С нахил змінюється приблизно на 2 мВ/рН. Для портативного приладу з вимогою похибки не більше $\pm 0,1$ рН достатньо проводити калібрування при поточній температурі розчину та зазначати її в протоколі вимірювань. За наявності у схемі датчика температури (наприклад, DS18B20 або NTC-термістора) можна реалізувати автоматичну температурну компенсацію за формулою:

$$S(T) = -0,05916 \cdot (T / 298,15) \text{ В/рН}$$

де T — температура розчину у кельвінах.

Якість буферних розчинів безпосередньо впливає на точність калібрування. Стандартні буферні розчини рН 4,01 та рН 6,86 виготовляються відповідно до ДСТУ або ГОСТ 8.135 і мають похибку рН не більше $\pm 0,02$ одиниці при температурі 25 °С. Після відкриття флакон буферу слід зберігати у щільно закритому вигляді в прохолодному місці; термін придатності відкритого розчину, як правило, не перевищує 3 місяці. Забруднення буферу електродом або

					ДП.МТІР.1158276.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		44

сторонніми речовинами неприпустиме — кожен електрод слід занурювати у невелику кількість буфера, налиту у одноразовий контейнер, а не безпосередньо у флакон [2, 8].

Критерієм успішного калібрування є стабільність показань аналогово-цифрового перетворювача у буферних розчинах: стандартне відхилення між $N = 10$ послідовними вимірюваннями не повинне перевищувати ± 5 одиниць АЦП, що відповідає приблизно $\pm 0,004$ В або $\pm 0,02$ рН. Якщо спостерігається значне нестабільне дрейфування сигналу, слід перевірити якість контактів, стан електрода та чистоту буферного розчину. Рекомендована періодичність повторного калібрування становить один раз на 24 години активного використання або кожного разу після тривалого зберігання електрода в сухому стані.

Алгоритм калібрування, реалізований у скетчі, може бути активований окремою кнопкою або послідовністю натискань основної кнопки. Під час калібрування дисплей відображає поточне значення напруги АЦП у вольтах та запит підтвердження для кожного буфера. Після введення обох точок мікроконтролер виконує розрахунок за формулами (3.5)–(3.6), зберігає результат у NVS та повідомляє про завершення калібрування відображенням значення нахилу у мВ/рН, що дозволяє оцінити стан електрода прямо на місці вимірювань.

Контроль якості калібрування включає перевірку значення нахилу: для справного електрода S повинно знаходитися у діапазоні $-50 \dots -65$ мВ/рН (при 25°C). Вихід за ці межі свідчить про забруднення або фізичне пошкодження мембрани. У цьому разі рекомендується регенерація електрода зануренням у буфер рН 4,01 на 30 хвилин або, при неефективності процедури, заміна електрода. Своєчасне виявлення деградації електрода є ключовою умовою отримання достовірних результатів вимірювань рН у польових умовах

					ДП.МТІР.1158276.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		45

					ДП.МТІР.1158276.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ВИСНОВКИ

У бакалаврській роботі виконано розробку портативного приладу для вимірювання рівня рН у рідинах на основі мікроконтролера ESP32 та досліджено основні аспекти його схемотехнічної реалізації і метрологічного забезпечення.

У процесі виконання роботи отримано такі результати:

1. Проведено аналіз сучасних методів вимірювання рівня рН та технічних засобів контролю кислотності рідин. Встановлено, що використання мікроконтролерних систем дозволяє забезпечити високу функціональність, компактність і доступність портативних вимірювальних приладів.

2. Досліджено принцип дії скляних рН-електродів та особливості формування вимірювального сигналу. Визначено основні фактори, що впливають на точність вимірювань, зокрема температурні зміни, старіння електрода та нестабільність параметрів електронних компонентів.

3. Розроблено структурну схему портативного рН-метра, що містить аналогову та цифрову частини. Аналогова частина забезпечує підсилення та узгодження сигналу від рН-електрода, а цифрова частина на базі ESP32 виконує обробку вимірювальної інформації, обчислення значення рН та керування інтерфейсом користувача.

4. Виконано схемотехнічне проектування вимірювального каналу з урахуванням високого внутрішнього опору рН-електрода та вимог до мінімізації впливу зовнішніх завад на результати вимірювань.

5. Розроблено програмне забезпечення мікроконтролера ESP32 для збору, обробки та відображення результатів вимірювань. Реалізовано алгоритми цифрової фільтрації та математичного перетворення сигналу у значення рН.

6. Розглянуто процедури метрологічного забезпечення приладу та розроблено методику його калібрування з використанням стандартних буферних розчинів. Показано, що калібрування дозволяє компенсувати систематичні відхилення та підвищити достовірність результатів вимірювання.

					ДП.МТІР.1158276.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		47

7. Проведено аналіз невизначеності вимірювань відповідно до сучасних метрологічних підходів. Визначено основні складові сумарної невизначеності, серед яких найбільший вплив мають характеристики рН-електрода, похибки калібрувальних розчинів, роздільна здатність аналого-цифрового перетворювача та температурні впливи.

8. Підтверджено можливість практичної реалізації розробленого пристрою на базі ESP32 для використання в лабораторних, виробничих, екологічних та освітніх системах контролю кислотності рідин.

					ДП.МТІР.1158276.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		48

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Яцина Л.В., Руда М.М., Автоматизовані системи контролю параметрів рідин та повітря на основі сенсорних технологій - Проблемно-наукова міжгалузева конференція «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології (АКІТ - 2026)», Тернопіль, 2026 – с. 68-70.
2. Поліщук Є.С., Дорожовець М.М., Стадник Б.І. та ін. Засоби та методи вимірювань неелектричних величин: Підручник. /За ред. Є.С.Поліщука. — Львів.: Видавництво «Бескид Біт», 2008. — 618 с.
3. Основи метрології та вимірювальної техніки / Лис, О.М., Якименко, М.В., Шинкаренко [та ін.]. - Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2021. – 424 с.
4. Ванько В. М., Поліщук Є. С., Дорожовець М. М., Яцук В. О., Яцук Ю. В. Вимірювальні перетворювачі (сенсори) : підручник / за ред. Є. С. Поліщука, В. М. Ванька. — Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2015. — 580 с.
5. Цюцюра В. Д., Цюцюра С. В. Метрологія та основи вимірювань: К.:Знання-Прес, 2018. – 180с.
6. Метрологія, вимірювання та контроль: Навчальний посібник / О.В. Бєлова, Ю.І. Гринюк, М.С. Ємельянов. - К.: Видавничий дім "Паливода А.С.", 2020. – 193с.
7. Метрологія та вимірювання: Навч.посіб. / М. Дорожовець, Р. Івах, В. Мотало [та ін.]; за наук. ред. Б.І. Стадника. - Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2018. – 312 с.
8. Обробка результатів фізичних вимірювань: навч. посібник / І.Ф.Скіцько, О.І.Скіцько. - КПІ ім .Ігоря Сікорського. - Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. - 88 с. [Електронний ресурс]: - Режим доступу: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/25320/1/Obrobka_rezult._fizych._vymi_ruivan.pdf .

					ДП.МТІР.1158276.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		49

9. Програмування Arduino - [Електронний ресурс]. / Режим доступу - <https://forum.arduino.ua/viewforum.php?id=1>.
10. Основи метрології та електричних вимірювань : підручник / В. В. Кухарчук, В. Ю. Кучерук, Є. Т. Володарський, В. В. Грабко. – Херсон: Олді-плюс, 2013. – 538 с.
11. Квасніков В. П., Ларін В. Ю. Проектування мікропроцесорних систем вимірювання та контролю : підручник. Київ : Книжкове вид-во НАУ, 2008. 352с.
12. Орнатський П. П. Цифрові вимірювальні прилади : підручник. Київ : Вища школа, 1983. 415 с.
13. Сухий К. М., Беяновська О. А., Козлов Я. М. Методи та засоби аналітичного контролю в хімічній технології : навч. посіб. Дніпро : ДВНЗ УДХТУ, 2018. 164 с.
14. Бокітько А. О., Зінковський Ю. Ф. Схемотехніка електронних систем : підручник : у 2 кн. Кн. 2 : Вимірювальні перетворювачі сигналів. Київ : НТУУ «КПІ», 2011. 380 с.
15. Тимчик Г. С., Скіцюк В. І. Електронні системи в приладобудуванні : підручник. Київ : НТУУ «КПІ», 2014. 312 с.
16. Arduino LLC. Arduino IDE 2 Documentation. — 2024. URL: <https://docs.arduino.cc/software/ide-v2> (дата звернення: 18.04.2025).
17. Бойко В. І., Гуржій А. М., Жуйков В. Я. та ін. Схемотехніка електронних систем : підручник у 3 кн.. — 2-ге вид., допов. і переробл. — Київ : Вища школа, 2004. — 366 с.
18. Espressif Systems. Arduino-ESP32 Getting Started Guide. — 2024. URL: https://docs.espressif.com/projects/arduino-esp32/en/latest/getting_started.html (дата звернення: 18.04.2025).

					ДП.МТІР.1158276.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		50