МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Глухівський національний педагогічний університет
імені Олександра Довженка

Кухарчук Р. П., Рябко А. В., Заїка О.В., Качурик І.І., Кугай Н.В.,
Сухойваненко Л.Ф., Шелудько В.І.

СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ТЕМПЕРАТУРИ БЕТОННОЇ СУМІШІ ТА РЕЄСТРАЦІЇ СИГНАЛУ ЄМНІСНОГО СЕНСОРА

Методичні рекомендації

Науково-методичне видання

Апаратно-програмний комплекс на базі
Arduino Nano, DS18B20, SEN0193 та OLED SSD1306

Глухів
2026

УДК 536.5:537.226:691.32(072)
С 40

Рекомендовано до друку вченою радою Глухівського національного педагогічного університету імені Олександра Довженка (протокол № 5 від «4» листопада 2026 р.).

Рецензенти:

Луценко Г.В. – доктор педагогічних наук, професор, проректор з науковопедагогічної роботи, Глухівський національний педагогічний університет імені Олександра Довженка;

Грудинін Б.О. – доктор педагогічних наук, доцент, завідувач кафедри фізики, Національний університет біоресурсів і природокористування України.

Кухарчук Р. П., Рябко А. В., Заїка О. В., Качурик І. І., Кугай Н. В., Сухойваненко Л. Ф., Шелудько В. І. Система контролю температури
С 40 бетонної суміші та реєстрації сигналу ємнісного сенсора : методичні рекомендації. Глухів: Глухівський НПУ ім. О. Довженка, 2026. 51 с.

ISBN 978-966-376-178-7

У методичних рекомендаціях описано апаратну архітектуру та програмне забезпечення системи на основі Arduino Nano. Розглянуто підключення температурного датчика DS18B20 і ємнісного сенсора SEN0193, способи індикації та журналювання даних, порядок монтажу, функціональної перевірки, обслуговування й оцінювання характеристик вимірювальних каналів. Наведено схеми, програмні лістинги, розрахунки та форми облікової документації.

Видання адресовано інженерно-технічним працівникам підприємств із виготовлення бетонних сумішей, фахівцям з електроніки та автоматизації, технологам і відповідальним за експлуатацію вимірювального обладнання. Матеріали також можуть використовуватися в освітньому процесі під час підготовки майбутніх фахівців.

УДК 536.5:537.226:691.32(072)

ISBN 978-966-376-178-7

© Кухарчук Р. П., Рябко А. В., Заїка О.В., Качурик І.І., Кугай Н.В., Сухойваненко Л.Ф., Шелудько В.І., 2026
© Глухівський НПУ ім. О. Довженка, 2026

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА 4
1. ПРИЗНАЧЕННЯ, ЗАВДАННЯ ТА МЕТОДИЧНІ ЗАСАДИ 5
2. АРХІТЕКТУРА ТА ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМИ 7
3. МЕТРОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ І РОЗРАХУНКИ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ 13
4. ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ, КОНСТРУКЦІЯ ТА МОНТАЖ У ВИРОБНИЧИХ УМОВАХ 16
5. ФУНКЦІОНАЛЬНІ ВИПРОБУВАННЯ, ПЕРЕВІРКА ПІСЛЯ МОНТАЖУ ТА ПЕРІОДИЧНИЙ КОНТРОЛЬ 19
6. ПЕРЕВІРКА ТЕМПЕРАТУРНОГО КАНАЛУ ТА ОПРАЦЮВАННЯ СИГНАЛУ SEN0193 22
7. ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ, ЖУРНАЛЮВАННЯ ТА КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ ДАНИХ 26
8. РИЗИКИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ, ДІАГНОСТИКА ТА ТЕХНІЧНЕ ОБСЛУГОВУВАННЯ 29
9. ОЦІНЮВАННЯ ТЕХНІЧНОЇ ТА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ 31
ВИСНОВКИ ТА ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ 33
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 34
ДОДАТОК А 36
ДОДАТОК Б 40
ДОДАТОК В 41
ДОДАТОК Г 42
ДОДАТОК Д 43
ДОДАТОК Е 44
ДОДАТОК Ж 46
ДОДАТОК И 47
ДОДАТОК К 48
ДОДАТОК Л 49
ДОДАТОК М 50

ПЕРЕДМОВА

Методичні рекомендації присвячено конструкції та практичному застосуванню мікроконтролерної системи для реєстрації температури бетонної суміші й аналізу сигналу ємнісного датчика. Описано електричні з’єднання, програму контролера, реєстрацію даних на комп’ютері, технічне обслуговування та порядок перевірки вимірювальних каналів.

Температуру реєструє датчик DS18B20 [1]. Другий канал використовує ємнісний сенсор SEN0193 [2]. Фізичну доцільність ємнісної реєстрації в цементних матеріалах підтверджено результатами опублікованих досліджень свіжого бетону, розчинів і бетонних блоків [10; 11; 16]. Числові дані цих робіт розглянуто у розділі 6 з урахуванням застосованих датчиків та методів вимірювання.

Матеріал побудовано за послідовністю використання комплексу: підбір обладнання, монтаж, налаштування, перевірка вимірювальних каналів, оброблення й архівування даних та технічне обслуговування. Окремо наведено порівняльний аналіз результатів опублікованих експериментів.

1. ПРИЗНАЧЕННЯ, ЗАВДАННЯ ТА МЕТОДИЧНІ ЗАСАДИ

1.1 Практичні передумови та призначення системи

Для невеликого виробництва важливо знати температуру суміші в контрольній точці та простежувати її зміну в часі. Arduino Nano дає змогу поєднати локальну індикацію, температурне сповіщення і запис показів на ПК без складної системи автоматизації.

Комплект розміщують поруч із контрольним зразком, а не в робочому об’ємі бетонозмішувача. Датчик температури встановлюють у фіксованому положенні; чутливу частину SEN0193 розташовують у стандартній контрольній пробі. Електронні плати й з’єднувачі захищають від цементного розчину, пилу та бризок.

1.2 Мета, функції та сфера використання комплексу

Систему призначено для реєстрації температури бетонної суміші та вихідного сигналу SEN0193, відображення поточних показів, сповіщення про перевищення встановленого температурного порога і передавання даних на комп’ютер.

До складу входять Arduino Nano, цифровий датчик DS18B20, ємнісний SEN0193, OLED-дисплей і світлозвукова індикація. Час реєстрації додає програма на ПК. Система не керує дозуванням води чи бетонозмішувачем; для таких функцій потрібні окремі технологічні засоби.

Наведені монтажна схема, характеристики компонентів, програми, порядок перевірки каналів, способи опрацювання сигналу SEN0193 та форми технічного обліку дають змогу відтворити запропоновану конструкцію.

1.3 Принципи вимірювання та опрацювання даних

DS18B20 передає результат температурного вимірювання у градусах Цельсія. SEN0193 формує напругу, яку Arduino Nano перетворює на код 10-бітного АЦП. На відміну від температури, цей код не має універсального перерахунку у відсотки води. Залежність визначається складом бетону, вмістом і властивостями води, температурою та положенням чутливої частини. Тому для порівняння проб зберігають однакові умови вимірювання.

1.4 Практична цінність і принципи достовірного використання даних

Використання Arduino Nano забезпечує доступність комплектувальних, зміну програмних параметрів і можливість зберігати послідовні покази. У конструкції передбачено індикацію поточної температури, коду АЦП і діагностичного стану. Завдяки цьому оператор може порівняти поведінку системи за кількома контрольними пробами.

Для контролю температури вирішальними є місце встановлення та порівняння з незалежним термометром. Для SEN0193 основою інтерпретації є залежність між кодом АЦП і складом контрольних проб, визначена за сталої геометрії та однакової процедури вимірювання. Опубліковані результати й розрахункову оцінку наведено в розділі 6.

2. АРХІТЕКТУРА ТА ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМИ

2.1 Призначення та межі застосування

Arduino Nano (ATmega328P) [3] зчитує DS18B20 та аналогову напругу на A0, керує індикацією і передає структуровані записи через USB. Склад і призначення вузлів показано на рисунках 2.1–2.3.

Контролер працює без комп'ютера, якщо потрібні лише поточні покази. Для журналювання з календарними мітками потрібні ПК та окрема програма, наведена в додатку Е. Код SEN0193 зберігають разом із температурою, оскільки тепловий стан впливає на електрофізичні властивості цементної суміші.

Система є низьковольтним локальним засобом контролю та індикації. Вимірювання й індикація працюють автономно від ПК, а календарне журналювання здійснюється лише за підключеного комп'ютера із запущеною програмою реєстрації. Результати температурного каналу використовують у межах погоджених умов контролю; дані SEN0193 відображають як цифровий код АЦП.

2.2 Склад компонентів, архітектура та монтажні з'єднання



Рисунок 2.1. Компоненти апаратно-програмного комплексу



Рисунок 2.2. Функціональна структура комплексу



Рисунок 2.3. Монтажна схема підключення компонентів прототипу

Рисунок 2.3 містить монтажні з'єднання вузлів і призначення виводів. Під час виготовлення друкованої плати або модифікації схеми додатково складають принципову електричну схему із номіналами елементів, джерелами живлення та допустимими струмами.

Комплектувальні елементи та перевірки перед монтажем наведено в таблиці 2.1, електричні з’єднання — у таблиці 2.2.

Таблиця 2.1.

Специфікація комплектувальних елементів системи

№	Найменування	К-сть	Критерії вхідного контролю комплектувальних елементів
1	Arduino Nano, ATmega328P (класична версія)	1	USB-роз’єм, сумісність із Arduino IDE, кабель.
2	DS18B20 у захисному зонді	1	Три дроти, герметичність та придатність оболонки до умов роботи.
3	Ємнісний аналоговий SEN0193	1	Саме SKU SEN0193, комплектний кабель, непошкоджене покриття.
4	OLED SSD1306 128×64 I²C	1	Контакти GND/VCC/SCL/SDA; підтверджена допустима напруга модуля.
5	Світлодіоди зелений і червоний	По 1	Резистори 220–330 Ом для кожного.
6	Пасивний малопотужний бузер	1	Сумісний з керуванням tone(); за більшого струму — транзисторний ключ.
7	Резистор 4,7 кОм	1	Для лінії DS18B20.
8	Проводи, клеми, макетна/монтажна плата	Компл.	З’єднання мають бути закріплені, не на вільних перемичках у цеху.
9	Корпус і кабельні вводи, джерело USB 5 В	Компл.	Захист від пилу, бризок, випадкового дотику та механічного пошкодження.
10	ПК з USB для налаштування / запису CSV	1	Для журналу даних ПК має працювати весь час вимірювань.

Таблиця 2.2.
Схема підключення компонентів до Arduino Nano та вимоги до електричних з'єднань

Пристрій	**Електричні з'єднання та виводи контролера**	**Обов'язкова умова**
DS18B20	DATA → D2; VDD → 5V; GND → GND	4,7 кОм між DATA і +5V
SEN0193	AO → A0; VCC → 5V; GND → GND	Не змочувати верхню частину
OLED SSD1306	SDA → A4; SCL → A5; GND → GND	VCC відповідно до вимог конкретного модуля
Зелений LED	D3 → резистор → анод; катод → GND	Струмообмежувальний резистор
Червоний LED	D4 → резистор → анод; катод → GND	Струмообмежувальний резистор
Пасивний бузер	D5 → керувальний вивід; GND → GND	Не перевищувати допустимий струм виводу
Комп'ютер/живлення	USB Arduino Nano	Не створювати неконтрольоване паралельне живлення

2.3 Функціональні вимоги й технічні характеристики

Таблиця 2.3.
Функціональні вимоги до дослідної системи та критерії їх перевірки

Код вимоги	**Контрольована функція / обмеження**	**Перевірка допуску**
R-01	DS18B20 зчитується через D2 з підтягуванням 4,7 кОм.	Порівняння зі справним контрольним термометром.
R-02	SEN0193 подає на A0 аналоговий сигнал. У журналі зберігають ADC, а не % води.	Контроль зміни ADC у двох відтворюваних середовищах.

Код вимоги	Контрольована функція / обмеження	Перевірка допуску
R-03	SSD1306 128×64 відображає температуру, ADC та стан.	Візуальна перевірка у межах приймального тесту.
R-04	D3/D4/D5 подають світловий та звуковий сигнали.	Тест порога й відмови температурного каналу.
R-05	USB видає розділені «;» записи приблизно раз на 2 с.	Звірення значень OLED/USB і часових проміжків.
R-06	Запис календарного часу можливий лише за наявності ПК та програми журналювання.	Перевірка файлу CSV на ПК і часової зони.
R-07	Відносний індекс SEN0193 вимкнено до окремого калібрування.	У CSV — NA; OLED — OFF.
R-08	Система не використовується для операцій, від яких залежить безпека чи приймання продукції.	Затверджене внутрішнє обмеження й інструктаж оператора.

Таблиця 2.4.

Технічні характеристики компонентів та обмеження їх застосування

Величина	Відомості виробника / принцип	Застереження
DS18B20: діапазон	−55…+125 °C для мікросхеми [1]	Кабель, герметизація й оболонка можуть мати вужчі межі.
DS18B20: точність	±0,5 °C у діапазоні −10…+85 °C [1]	Не дорівнює сумарній невизначеності змонтованого каналу.
DS18B20: крок коду	0,0625 °C за 12-бітної роздільності [1]	Роздільність не тотожна точності.
DS18B20: перетворення	До 750 мс у 12-бітному режимі [1]	Плюс зчитування ADC, I²C, USB і затримки програми.

Величина	Відомості виробника / принцип	Застереження
SEN0193: живлення	3,3–5,5 В; типовий струм близько 5 мА [2]	Не плутати із допустимістю 5 В для OLED.
SEN0193: вихід	Аналоговий, у документації Wiki 0–3 В [2]	НЕ градуювання у % масової вологості.
Arduino Nano: АЦП	10-бітне значення 0…1023	Оцінку напруги визначає фактична опора АЦП.
OLED 128×64	I²C, 1024 байт кадрового буфера	На ATmega328P із 2 КБ SRAM важливо контролювати пам’ять.
Температурний поріг	30 °C — лише тестове значення коду	Заміна порога обов’язкова за технологічним регламентом.

У таблиці 2.4 зведено паспортні характеристики основних компонентів. Параметри завершеного пристрою визначають за умовами його монтажу та результатами відповідних контрольних перевірок.

2.4 Умови застосування та розподіл відповідальності

• Керівник підприємства або відповідальний за впровадження визначає місце розташування комплексу, режим спостережень та необхідні ресурси.
• Технолог установлює контрольну точку, температурний поріг і порядок реагування відповідно до рецептури та стадії технологічного процесу.
• Фахівець з електроніки забезпечує монтаж, налаштування вбудованої програми, перевірку живлення, корпусу, індикації та обміну даними.
• Оператор виконує щозмінний огляд, контролює покази, веде журнал і повідомляє відповідальну особу про виявлені несправності.

3. МЕТРОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ І РОЗРАХУНКИ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ

3.1 Температурний канал DS18B20: точність і часовий відгук

Для контролю температури використано трипровідний DS18B20 у захисній гільзі. Для самої мікросхеми виробник задає похибку до ±0,5 °C в інтервалі −10…+85 °C [1]. Точність готового зонда залежить також від конструкції гільзи, теплового контакту та місця розміщення.

Дискретність 12-бітного результату дорівнює 0,0625 °C. У журналі збережено два знаки після коми для аналізу зміни температури в часі; це не означає, що фактична похибка становить 0,01 °C.

Перетворення DS18B20 у 12-бітному режимі триває до 750 мс. Контролер передає записи з номінальним інтервалом близько 2 с; фактичну періодичність визначають за журналом.

У 12-бітному режимі перетворення DS18B20 триває до 750 мс [1]. Програмою передбачено номінальний період оновлення 2000 мс, до якого входять перетворення температури, аналогове зчитування, робота дисплея та передавання даних через USB. Фактичний інтервал між записами контролюють за часовими мітками журналу.

3.2 Аналого-цифрове перетворення SEN0193

АЦП ATmega328P має 1024 кодові рівні: N = 0…1023. Номінальний крок становить $V_{ref}/1024$, а приблизна напруга відповідає $N \cdot V_{ref}/1024$ [7; 8]. За V_{ref} = 5,00 В один крок становить 4,883 мВ. Вихідна напруга SEN0193 за документацією виробника лежить у межах 0–3,0 В [2], тому за живлення Nano від 5 В очікувана верхня межа коду близька до 614.

10-бітний АЦП ATmega328P формує 1024 кодові рівні (N = 0…1023). Номінальний крок $q = V_{ref} / 1024$, а розрахункова напруга для відповідного коду $U \approx N \cdot V_{ref} / 1024$ [7; 8]. За V_{ref} = 5,00 В крок становить приблизно 4,883 мВ. Це ідеалізована оцінка: дійсні результати залежать від опорної напруги та похибок АЦП. Паспортний вихід SEN0193 не перевищує приблизно 3 В [2], тож за $V_{ref} \approx 5$ В його очікувані покази зазвичай нижчі від коду 615.

Таблиця 3.1.

Розрахункові значення вихідного коду АЦП та відповідної вхідної напруги за U_{ref} = 5,00 В

Код N (за U_{ref} =5,00 В)	**Обчислення**	**Результат**
0	0 × 5,00 / 1024	0,000 В
512	512 × 5,00 / 1024	2,500 В

Код N (за U_{ref} =5,00 В)	Обчислення	Результат
614	614 × 5,00 / 1024	2,998 В
1 LSB	5,00 / 1024	0,004883 В

Аналоговий сигнал SEN0193 залежить від електроживлення, температури, складу суміші та положення сенсора. Програма виконує десять зчитувань за цикл та зберігає округлене середнє значення коду АЦП. Усереднення зменшує вплив короткочасних коливань, однак не компенсує зміни опорної напруги чи інші систематичні чинники. Для поглибленого статистичного аналізу передбачають збереження первинних відліків або показників їх розкиду.

На результат SEN0193 впливають властивості порової рідини, вміст води, склад суміші, температура й умови підключення. Контролер обчислює округлене середнє десяти послідовних кодів; такий спосіб зменшує шум, але не усуває систематичних відхилень. Для статистики окремих циклів обліковують серію таких середніх.

3.3 Показники похибки, повторюваності та граничні критерії оцінювання

Для температурних вимірювань визначають відхилення $\Delta T_i = T_i - T_{контр,i}$, середнє зміщення та найбільше абсолютне відхилення. Для серії кодів АЦП обчислюють середнє $\bar{N}$ і стандартне відхилення s. Ці величини характеризують узгодженість записів у конкретних умовах; межі прийнятності встановлюють відповідно до призначення контролю.

Температурна сигналізація має гістерезис: попередження вмикається вище $T_{меж}$, а вимикається нижче $T_{меж} - H$. У програмі для прикладу H = 1 °C; значення температурного порога погоджує технолог.

Для серії із n незалежних результатів обчислюють середній код $\bar{N} = (\Sigma N_i)/n$ та вибіркове стандартне відхилення $s = \sqrt{[\Sigma(N_i - \bar{N})^2/(n-1)]}$ за $n \geq 2$. У протоколі зазначають кількість результатів, геометрію розміщення, умови реєстрації та діапазон коливань. Допустимі межі встановлюють відповідно до призначення конкретного контрольного завдання.

Температурне сповіщення використовує гістерезис: якщо $T > T_{меж}$, стан переходить у T_HIGH, а повернення у T_OK відбувається після $T < T_{меж} - H$, де H = 1 °C у зразку програми. Порогові значення й H необхідно перевірити та погодити для конкретного технологічного процесу.

3.4 Особливості інтерпретації значення 85 °C датчика DS18B20 та граничних кодів АЦП 0 і 1023

DS18B20 після подавання живлення містить початкове значення 85 °C до першого завершеного перетворення. У програмі перетворення завершують перед зчитуванням. Якщо показ різко змінюється, перевіряють живлення, з’єднання і температуру незалежним термометром.

Саме значення 85 °C не є безумовною ознакою несправності: така температура може бути фізично реальною. Відхилення оцінюють за повторними показами та умовами вимірювання.

DS18B20 після подавання живлення може містити в регістрі початкове значення 85 °C до завершення першого перетворення. Програма виконує завершене перетворення перед передаванням температури. У разі різкого відхилення показів температуру звіряють із контрольним термометром.

Для SEN0193 окремо позначають крайні коди АЦП та вихід за очікуваний для живлення 5 В діапазон. Такі записи є приводом перевірити кабель, напругу живлення й датчик.

4. ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ, КОНСТРУКЦІЯ ТА МОНТАЖ У ВИРОБНИЧИХ УМОВАХ

4.1 Структура низьковольтного живлення

Джерело живлення має забезпечувати стабілізовані 5 В через USB із запасом за струмом та захистом від короткого замикання. Для початкових випробувань використовують один визначений спосіб електроживлення. Не допускається неконтрольоване одночасне подавання живлення на шину 5V Arduino Nano та під'єднання ПК через USB. Мережеві кола 230 В повинні залишатися поза корпусом прототипу, якщо не розроблено окремого кваліфікованого електротехнічного рішення.

Таблиця 4.1.

Вимоги до електроживлення й контролю електричних вузлів

Вузол	Технічна вимога	Контроль
USB-живлення	Стабілізовані 5 В, достатній запас струму; надійний кабель	Контроль напруги під навантаженням
Arduino Nano	Коректна полярність; запобігання короткому замиканню	Огляд і функціональний запуск
OLED	Перевірити паспорт VCC і допустимі рівні I²C конкретної плати	За потреби — узгоджувач логічних рівнів
DS18B20	Трипровідний режим та окремий підтягувальний резистор	Омметр і тест при від'єднаному живленні
Сигналізатор	Вивід D5 лише для малострумового пасивного п'єзо	За більших струмів — окремий транзисторний ключ
Довгі сигнальні кабелі	Механічно захищені; прокладати окремо від силових трас	Перевірка стабільності показів і завад

Приклад для червоного світлодіода: для живлення 5 В, прямої напруги LED близько 2 В та резистора 330 Ом орієнтовний струм $I \approx (5 - 2)/330 \approx 9{,}1$ мА. Значення 2 В є прикладом, оскільки фактична пряма напруга залежить від типу світлодіода. Потужність на такому резисторі $P \approx 0{,}027$ Вт; запас резистора визначають за реальною збіркою.

4.2 Механічне виконання, корпус і прокладання кабелів

• Мікроконтролер, клеми, електронна частина SEN0193 та сполучення повинні перебувати поза прямим впливом цементного розчину, бризок, вологи та абразиву.

• Корпус підбирають за фактичним середовищем (пил, бризки, механічні ризики). Сам напис IP65 на корпусі не гарантує захисту готової збірки без належних вводів і ущільнень.

• Датчик температури розташовують у репрезентативній, фіксованій контрольній точці без механічного пошкодження гільзи. Не переносити результати точкового датчика на весь об'єм без обґрунтування.

• Проводку фіксують; кінці кабелів маркують; роблять розвантаження від натягу та можливість заміни зонда без перепаювання всієї системи.

• Плата SEN0193 не призначена виробником для постійного перебування всередині бетонозмішувача чи в агресивній цементній масі; для етапу дослідної експлуатації застосовують погоджену контрольну пробу й окрему оцінку захисту.

У роботі Porras та співавторів [12] встановлено, що в малих бетонних зразках розміщення вбудованих датчиків може впливати на механічні результати випробувань; наведене авторами зменшення міцності на розтяг до 37,5 % стосувалося обмеженої серії. Тому в запропонованій конструкції SEN0193 встановлюють у спеціально відібраній контрольній пробі, а не в елементі, призначеному для перевірки міцності.

4.3 Монтажна контрольна перевірка

Таблиця 4.2. Контрольний перелік перевірки правильності монтажу системи

Критерій	Метод	Статус
Немає переплутаних VCC/GND	Огляд розводки до подачі напруги	□ Так □ Ні
D2↔DS18B20 та 4,7 кОм	Перевірка монтажу й резистора	□ Так □ Ні
A0↔SEN0193	Огляд і тест аналогового показу	□ Так □ Ні
A4/A5↔SDA/SCL	Огляд і сканування I^2C у разі проблем	□ Так □ Ні
LED через резистори	Огляд номіналів	□ Так □ Ні

Критерій	Метод	Статус
Немає оголених контактів у зоні бризок	Огляд корпусу і вводів	□ Так □ Ні
Наявні інвентарний номер і схема в корпусі	Огляд паспорта обладнання	□ Так □ Ні
Зазначено версію прошивки та поріг	Звіряння реєстру змін	□ Так □ Ні

5. ФУНКЦІОНАЛЬНІ ВИПРОБУВАННЯ, ПЕРЕВІРКА ПІСЛЯ МОНТАЖУ ТА ПЕРІОДИЧНИЙ КОНТРОЛЬ

5.1 Стендові функціональні випробування (FAT)

FAT (factory acceptance test) тут означає внутрішню функціональну перевірку прототипу на столі. Це не державна повірка, не сертифікація та не підтвердження метрологічної придатності. Перед тестом записують версію коду, значення порога, фактичне живлення, модель датчиків, місце і дату.

Таблиця 5.1.

Програма стендових функціональних випробувань системи (FAT)

ID	Тест / дія	Очікуваний результат	Факт
F01	Увімкнення від USB	OLED або USB-журнал відповідає, живлення стабільне	
F02	Зчитування DS18B20	Зіставлення із контрольним термометром: відхилення у заздалегідь установленій межі; записана невизначеність еталона.	
F03	Від'єднання DATA DS18B20 (за вимкненого живлення)	Після ввімкнення T_ERROR; червоний LED, звук	
F04	Імітація перевищення порога контрольним нагрівом	T_HIGH, червоний LED, звук	
F05	Повернення нижче поріг−гістерезис	T_OK, зелений LED; звук вимкнений	
F06	Тест без OLED (підготувати при вимкненому живленні)	Після запуску без OLED: OLED_NO_ACK у USB; червоний LED і 1000 Гц. Це контроль відповіді I^2C, не якості зображення.	
F07	SEN0193 за різних контрольних умов	Зміна ADC; без заяв про абсолютну вологість	

ID	Тест / дія	Очікуваний результат	Факт
F08	USB-журнал на ПК ≥ 10 хв	Послідовні рядки, час ПК, перевірка пропусків	
F09	Перезапуск Nano	Повторний заголовок у USB; логер не дублює заголовок у CSV; uptime_ms зменшується.	
F10	Повернення нормальної конфігурації	Всі датчики з'єднані, у протоколі зафіксовано підсумок	_____

Проводити від'єднання контактів і перепідключення лише за відключеного живлення. Для температурного тесту використовувати контрольовану теплу воду у безпечній ємності лише за умови, що металевий зонд та його герметизація придатні для контакту з водою; електроніку не занурювати.

5.2 Функціональна перевірка на місці встановлення (SAT)

SAT (site acceptance test) — короткий пусковий тест після встановлення на підприємстві. Перевіряють, чи корпус захищено від можливого пошкодження, чи немає наводок від змішувача, чи зберігається зв'язок USB і чи відповідає температура незалежному засобу контролю за фактичних умов.

Таблиця 5.2.
Програма функціональних випробувань системи на місці встановлення (SAT)

Критерій	Процедура	Результат / рішення
Стабільність живлення	Спостерігати роботу під час штатного режиму навколишнього обладнання	
Показ температури	Зіставити мінімум у 3 стабільних контрольних точках/станах	
Відтворюваність ADC	Порівняти n ≥ 5 зчитувань за сталої геометрії	
Сигналізація	Перевірити сприйнятність світлових і звукових сигналів оператором у робочій зоні	

Критерій	Процедура	Результат / рішення
Облік даних	Знайти CSV за датою, визначити місце зберігання резервної копії	
Оператор	Працівник відтворює щозмінний порядок та дії при відмові	

6. ПЕРЕВІРКА ТЕМПЕРАТУРНОГО КАНАЛУ ТА ОПРАЦЮВАННЯ СИГНАЛУ SEN0193

6.1 Перевірка DS18B20 із незалежним термометром

1. Визначити потрібний діапазон температур і контрольний термометр із відомою придатністю для такого завдання.
2. Підготувати щонайменше три температурні стани, що перекривають характерний для дослідного застосування інтервал, без перевищення меж зонда.
3. Дочекатися теплової рівноваги у кожній точці; покази порівнювати тільки в одному фізичному середовищі та однаковій геометрії контакту.
4. Записати $T_{контр}$, TDS, різницю ΔT та стабільність показів у кожній точці.
5. Оцінити максимальну різницю та ухвалити рішення з урахуванням потрібної похибки й характеристик контрольного термометра.
6. Не змінювати програму випадковою «поправкою», доки не встановлено природу систематичного відхилення.

Таблиця 6.1.
Форма реєстрації результатів перевірки температурного каналу DS18B20

Точка	$T_{контр}$, °C	TDS, °C	ΔT, °C	Примітка
1				
2				
3				
4				

6.2 Порядок реєстрації та оцінювання сигналу SEN0193

Покази SEN0193 фіксують у контрольній пробі однієї рецептури за однакової глибини встановлення й заданого часу після змішування. Разом із кодом АЦП записують температуру, маси складників і вологість заповнювачів за виробничим обліком. Для зіставлення застосовують незалежно визначений вміст води або водоцементне відношення; ці величини не слід змішувати.

Таблиця 6.2.
Чинники впливу на вихідний сигнал SEN0193 та способи їх контролю

Фактор	Параметр	Фіксація
Рецептура, фракції, цемент, добавки	Діелектричний відгук залежить від складу	Паспорт проби / партії
Кількість води та її спосіб обліку	Це незалежна змінна досліду, а не результат SEN0193	Ваговий/технологічний облік
Температура суміші	Може змінювати властивості та покази	Окремо DS18B20/контрольний прилад
Глибина та напрям сенсора	Змінює досліджуваний об’єм	Шаблон розміщення та схема
Час після змішування	Процеси у свіжому цементному матеріалі змінюються	Тривалість від моменту приготування
Стан покриття й очищення	Сенсор може деградувати від лужного середовища й абразиву	Огляд до/після кожного досліду

Під час оцінювання повторюваності використовують серію вимірювань однієї проби. Під час порівняння різних проб зберігають незмінними температуру, геометрію встановлення, склад твердих компонентів і тривалість від закінчення змішування до зчитування.

6.3 Експериментальні результати ємнісного контролю бетонних матеріалів

Chen, Shen і Shui [10] експериментально встановили вплив вмісту води та температури на діелектричні характеристики свіжої бетонної суміші за допомогою георадара. Wang та співавтори [11] випробували три конструкції ємнісних датчиків на піску й цементному розчині та виявили нелінійне зростання ємнісного сигналу зі збільшенням вологості. Oommen і Philip [16] провели гравіметричний контроль зразків бетонних блоків та зіставили його з показами планарного ємнісного датчика: у дослідженому інтервалі вміст вологи змінювався від 0 до 11,34 %, а міжелектродна ємність збільшилася приблизно на 74 %.

У дослідженні Porras та співавторів [12] використано Arduino, температурні датчики DS18B20 та Soil Moisture Sensor v1.2 на бетонних циліндрах і заводських залізобетонних виробах. У статті наведено температури від 15 до 35 °C і показники датчиків вологості приблизно від 100 до 45 % залежно від умов витримування. Ця відсоткова шкала не є тотожною масовому вмісту води у бетоні. Модель Soil Moisture Sensor v1.2 є спорідненим за принципом сенсором, але числові покази не можна переносити безпосередньо на SEN0193.

Для самого SEN0193 є кількісно перевірені результати в інших пористих середовищах. Abdelmoneim та співавтори [13] дослідили 12 датчиків у пилувато-суглинковому ґрунті: після градуювання одержано R^2 = 0,85–0,87 та RMSE = 4,5–4,9 відсоткового пункта. Thelaidjia та співавтори [14] випробували SEN0193 у модельних середовищах із різними розмірами частинок і солоністю; для сенсора наведено R^2 = 0,68–0,80 та RMSE = 8,9–12,9 відсоткового пункта об'ємного вмісту води. Ці величини характеризують відповідні експерименти, а не точність SEN0193 у бетонній суміші.

Таблиця 6.3.

Підтверджені експериментальні результати, наведені у наукових публікаціях

Джерело	**Середовище та метод**	**Результат, важливий для системи**
Chen та ін., 2012 [10]	Свіжа бетонна суміш, георадар	Залежність діелектричного показника від води й температури; числової калібровки SEN0193 немає
Wang та ін., 2021 [11]	Цементний розчин, ECT	Нелінійне зростання ємнісного відгуку зі збільшенням вологості
Oommen, Philip, 2023 [16]	Бетонні блоки, планарний ємнісний сенсор	Вміст вологи 0–11,34 %; ємність збільшилася приблизно на 74 %
Porras та ін., 2025 [12]	Бетонні зразки та заводські вироби, DS18B20 і Soil Moisture v1.2	Температура 15–35 °C; індиковані показники 100–45 %
Abdelmoneim та ін., 2025 [13]	SEN0193, пилувато-суглинковий ґрунт	R^2 = 0,85–0,87; RMSE = 4,5–4,9 в.п.
Thelaidjia та ін., 2026 [14]	SEN0193, модельні пористі середовища	R^2 = 0,68–0,80; RMSE = 8,9–12,9 в.п. об'ємної вологості

Наведені публікації підтверджують чутливість діелектричних та ємнісних методів до води у цементних матеріалах. Водночас вони використовують різні електроди, частоти, зразки й системи градуювання. Тому експериментальні числові співвідношення слід використовувати в межах умов кожного джерела; вони не є готовою шкалою «вологість бетону — код АЦП SEN0193».

6.4 Кількісне зіставлення опублікованих результатів

Числові дані роботи Oommen і Philip [16] дозволяють оцінити масштаб зміни ємнісного відгуку без припущень про електричний вихід SEN0193. За стандартним гравіметричним методом автори дослідили бетонні блоки з вмістом вологи від 0 до 11,34 %. У цій області виміряна ємність зросла приблизно на 74 % порівняно з її значенням для початкового стану.

Якщо позначити ємність для стану з нульовим вмістом вологи як C_0, то нормована ємність на початку становить $C/C_0 = 1{,}00$, а у вологому кінцевому стані — приблизно 1,74. Середній відносний приріст між двома крайніми станами становить 74 / 11,34 ≈ 6,53 % від C_0 на один відсотковий пункт вмісту вологи. Це похідний розрахунок за двома опублікованими граничними значеннями, а не припущення про лінійність фактичної залежності між ними.

За даними Porras та співавторів [12] підтверджено також можливість реєструвати зміну температури й показів недорогих сенсорів під час витримування бетонних виробів. Окремі випробування SEN0193 [13; 14] показують, наскільки сильно точність оберненого перерахунку залежить від властивостей середовища. Отже, результати дають кількісну основу для обґрунтування ємнісного контролю бетонних матеріалів, але не встановлюють універсального перетворення коду SEN0193 в кількість води.

Для робочого журналу рекомендовано зберігати як мінімум дату й час, температуру, усереднений код АЦП, номер проби, В/Ц за рецептурою та показники вологості заповнювачів. Дані різних рецептур не об’єднують в одну градуювальну криву без перевірки впливу їхнього складу.

6.5 Відносний індекс SEN0193 та правила його застосування

Умовний індекс між двома контрольними станами визначають за формулою $I = 100 \cdot (N - N_0)/(N_{100} - N_0)$, де N_0 і N_{100} — усереднені коди для двох зафіксованих станів; результат обмежують інтервалом 0…100. Якщо опорні коди збігаються, індекс не визначається.

Індекс зручний для зіставлення партій однакового складу, але не є самостійним вимірюванням масової вологості бетону. Для переходу до кількісного вмісту води використовують градуювальну залежність, отриману за незалежно встановленими характеристиками проб. Як приклад побудови такої залежності наведено розрахункову модель у підрозділі 6.4.

7. ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ, ЖУРНАЛЮВАННЯ ТА КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ ДАНИХ

7.1 Матриця діагностичних станів та сигналізації

Програма виконує завершене 12-бітне перетворення DS18B20, зчитує десять кодів АЦП SEN0193 й передає їх округлене середнє, визначає температурний стан за порогом і гістерезисом та передає CSV-подібні рядки через USB. Перевірка OLED виконується через відповідь пристрою за адресою I²C перед ініціалізацією та під час циклу. Наявність відповіді не підтверджує справності матриці дисплея. SEN0193 не запускає температурної аварійної сигналізації.

Таблиця 7.1.

Стани температурного каналу й індикації та відповідні дії оператора

Стан	Зелений LED	Червоний LED/п'єзо	Дії відповідальної особи
T_OK + OLED_ACK	Світиться	Ні	Вести спостереження та журнал вимірювань.
T_HIGH	Вимкнений	Так, 2000 Гц	Звірити температуру й діяти за інструкцією технолога.
T_ERROR	Вимкнений	Так, 1000 Гц	Не довіряти температурі; перевірити DS18B20 та кабель.
OLED_NO_ACK	Вимкнений	Так, 1000 Гц	Перевірити живлення, з'єднання SDA/SCL й адресу дисплея; запис через USB може тривати. Після повторного підключення за потреби перезапустити Nano.
ADC_EDGE_REVIEW або ADC_RANGE_REVIEW	Залежить від T	Самостійно не запускає сигнал	Перевірити живлення, A0, положення та стан SEN0193; прапорець сам собою не означає відмови.

Після перезапуску Nano лічильник uptime_ms починається з малого значення; також приблизно через 49,7 доби настає переповнення millis().

Відповідно, зменшення uptime_ms є ознакою розриву часової послідовності, але не однозначним доказом перезапуску. Пріоритет аварій: помилка температурного каналу або відсутність відповіді OLED — 1000 Гц; за відсутності таких помилок і перевищення порога — 2000 Гц. Календарний час формує ПК.

7.2 Структура запису даних та одиниці вимірювання

Таблиця 7.2.

Структура запису CSV, формати даних та діагностичні позначення

Поле CSV	**Тип / одиниця**	Пояснення поля
uptime_ms	Ціле число, мс	Час роботи Arduino від запуску, із циклічним переповненням.
temp_C	Число, °C або NA	Температура з DS18B20, якщо канал справний.
sen_adc	Ціле, 0…1023	Округлений середній код 10 відліків; не фізична вологість бетону.
index_rel	0…100 або NA	Вимкнено до калібрування; умовна шкала.
temp_status	T_OK / T_HIGH / T_ERROR	Стан температурного каналу.
sen_diag	ADC_READING / ADC_EDGE_REVIEW / ADC_RANGE_REVIEW	Інформаційні прапорці перевірки АЦП, не метрологічна діагностика.
display_status	OLED_ACK / OLED_NO_ACK	Наявність відповіді I²C на адресу дисплея (або відмова ініціалізації), не тест зображення.
pc_datetime_iso	Дата+час+зсув часової зони	Додається окремою програмою ПК; не надходить від Arduino.

Приклад структурованого рядка даних: 12045;24.75;478;NA;T_OK;ADC_READING;OLED_ACK. Порядок полів і позначення станів наведено в таблиці 7.2.

7.3 Запуск програми журналювання даних на ПК

1. Установити Python 3 та бібліотеку pyserial командою: python -m pip install pyserial.
2. Під’єднати USB і з’ясувати номер COM-порту Nano у диспетчері пристроїв (або послідовний пристрій Linux).
3. Закрити Serial Monitor та інші програми, що вже використовують порт; одночасний доступ зазвичай неможливий.
4. Запустити: python ConcreteMonitor_Logger_PrintFinal.py COM5, замінивши COM5 на фактичний порт.
5. Перевірити створення concrete_log_YYYYMMDD_HHMMSS.csv із полем pc_datetime_iso та часовими мітками, сформованими ПК.
6. На початку зміни записати у паспорт журналу: точку, рецепт, версію програми, поріг, оператора.
7. Завершувати запис комбінацією Ctrl+C і перевіряти кількість рядків; копіювати журнал до контрольованого архіву.

Календарний запис залежить від комп’ютера, електроживлення, USB-з’єднання та роботи програми реєстрації. Під час відсутності зв’язку Arduino Nano продовжує локальні вимірювання, проте дані за цей проміжок в пам’яті контролера не накопичуються. Програма ПК перевіряє структуру рядків, значення полів і фіксує паузи надходження даних понад 5 с.

Код Arduino Nano та програми журналювання наведено відповідно у додатках А та Е; для завантаження використано назви ConcreteMonitor_PrintFinal.ino і ConcreteMonitor_Logger_PrintFinal.py.

7.4 Контроль послідовності записів та резервування файлів

- Перевіряти послідовність часових міток ПК та обліковувати попередження про паузи понад 5 с. Номінальний інтервал становить приблизно 2 с; фактичний перевіряють за журналом.
- Зберігати незмінений оригінальний CSV; окремо створювати копію для графіків та аналізу.
- Кожному файлу присвоювати номер дослідного застосування, контрольну точку, зміну, дату й ім’я оператора в реєстрі метаданих.
- Після кожного робочого дня робити резервну копію за правилами підприємства й контролювати доступ до її редагування.
- Після перезапуску Nano аналізувати зміну uptime_ms; повторні службові рядки # firmware та заголовок програма ПК пропускає. Файли з різних сеансів не об’єднувати без пояснення часових меж.

8. РИЗИКИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ, ДІАГНОСТИКА ТА ТЕХНІЧНЕ ОБСЛУГОВУВАННЯ

8.1 Основні технічні ризики та запобіжні заходи

Таблиця 8.1.
Ризики дослідної експлуатації системи та заходи щодо їх обмеження

Ситуація	Наслідок	Бар'єр / дія	Пріоритет
Використання SEN0193 як вологоміра без градуювання	Можливе некоректне коригування рецептури	Застосування показів ADC тільки за призначенням; інструктаж персоналу	Критичний
Обрив температурного датчика	Немає достовірної T	Червоний LED/п'єзо, T_ERROR; незалежна перевірка	Високий
Втрата USB-журналювання	Відсутні дані спостережень	Контроль роботи ПК, архів, інструкція завершення	Середній
Волога або цемент на платі	Корозія, збої, коротке замикання	Корпус, вводи, інспекція, відокремлена контрольна проба	Високий
Помилковий температурний поріг	Хибні тривоги або пропуск відхилення	Погодження порога з технологом та паспорт прошивки	Високий
Силові наведення у кабелі	Нестійкі покази ADC/температури	Рознесення трас, правильна земля, випробування	Середній
Підключення 230 В до плати	Електрична небезпека	Готовий захищений адаптер, професійний електромонтаж	Критичний
Вихід сигналу ADC на межу	Можлива проблема датчика або проводки	ADC_EDGE_REVIEW і ручна діагностика	Середній

8.2 Періодичність і реєстрація технічного обслуговування

Таблиця 8.2.
Періодичність технічного обслуговування та форми документування

Періодичність / підстава	Рекомендовані операції	Обліковий документ
Перед зміною	Оглянути кабелі, роз'єми, корпус, індикацію, наявність журналювання	Бланк щозмінної перевірки
Після контакту сенсора з матеріалом	Зупинити прилад, оглянути покриття, очищати за підтвердженою технологією; не шкребти абразивом	Картка обслуговування
Періодично за графіком обслуговування	Повторна перевірка температури та ADC у контрольному стані	Протокол перевірки
Після заміни SEN0193	Повторити базову перевірку, не переносити старі опорні значення	Протокол перевірки компонентів
Після зміни програми	Зберегти версію, поріг, тестовий журнал, повторити FAT-ключові тести	Реєстр змін
Після аварії/збоїв	Припинити довіру до неперевірених даних, знайти причину	Картка несправності

8.3 Умови призупинення використання системи

• Призупиняють використання результатів температурного каналу за нестійкого зчитування, необґрунтованих стрибків або неможливості звірення з контрольним засобом.
• За пошкодження корпусу, ознак потрапляння вологи, перегрівання чи несправності електроживлення пристрій від'єднують від джерела живлення до усунення причини.
• Зміни рецептури бетонної суміші здійснюють за технологічним регламентом; сигнал SEN0193 застосовують для індикації та реєстрації, а не безпосереднього дозування.
• У разі відсутності робочого журналу або погоджених налаштувань відновлюють облік та контроль конфігурації перед продовженням спостережень.

9. ОЦІНЮВАННЯ ТЕХНІЧНОЇ ТА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

9.1 Облік витрат на створення та утримання

Капітальні витрати охоплюють закупівлю плат і датчиків, корпусу, кабелів, монтаж та перевірку. Поточні витрати складаються з обслуговування, заміни компонентів, роботи оператора й збереження даних. Економічну доцільність оцінюють за фактичною вартістю цих операцій і користю від наявності регулярного журналу.

9.2 Показники технічної результативності

Таблиця 9.1.
Показники результативності дослідного застосування та методи їх оцінювання

Показник	**Спосіб визначення**	Особливості інтерпретації
Повнота температурних журналів	Частка годин із придатними CSV-рядками	Обчислюють за наявними записами за визначений період.
Час реакції на перевищення	Різниця між часом події та записаною реакцією	Показник характеризує інформування, а не усунення причин події.
Витрати робочого часу	Порівняти ручне зчитування та підтримку приладу	Враховують обслуговування, перевірку і зберігання даних.
Стабільність температури в контрольній точці	Аналіз рядів і підтвердження незалежним приладом	Характеризує лише обрану контрольну точку.
Придатність SEN0193	Повторюваність і валідована залежність на окремих пробах	У разі кількісної інтерпретації використовують незалежні контрольні дані.

9.3 Варіанти використання та модернізації системи

Таблиця 9.2.
Варіанти рішень за результатами дослідної експлуатації

Рішення	Умови ухвалення рішення	Подальший крок
Залишити як індикатор температури	Температурний канал перевірено, журнал корисний, монтаж безпечний	Регламент обслуговування; призначити власника процесу.
Доопрацювати	Потрібні кращий корпус, захист живлення, журнал автономно	Скласти технічне завдання на модернізацію.
Купити промислове рішення	Потрібна технологічна відповідальність, дозування або приймання	Затвердити вимоги до промислового датчика і системи контролю.
Припинити використання системи	Вартість і ризики перевищують доведену користь	Оформити рішення, зберегти журнали та протоколи

Після налагодження системи можна використовувати температурні записи для порівняння партій, аналізу режимів тверднення та контролю умов зберігання зразків. SEN0193 придатний передусім для порівняння аналогового сигналу за однакової рецептури й геометрії. Для автоматизованого дозування складників потрібен окремий калібрований вимірювальний канал.

ВИСНОВКИ ТА ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

Апаратно-програмний комплекс поєднує температурний канал DS18B20, ємнісний датчик SEN0193, OLED-дисплей, світлозвукове сповіщення й передачу записів на комп'ютер. Монтажна схема, програмні лістинги та форми обліку визначають послідовність складання й експлуатації.

Періодичне зіставлення показів DS18B20 із контрольним термометром дає змогу оцінювати температурне зміщення з урахуванням конкретного зонда та місця встановлення. Дані фіксують у протоколі технічної перевірки.

Електрофізичний принцип ємнісної реєстрації має експериментальне підтвердження для свіжого бетону та цементних розчинів [10; 11; 15]. У роботі Porras та співавторів [12] описано застосування недорогих датчиків вологості й DS18B20 безпосередньо у бетонних елементах. Це обґрунтовує використання SEN0193 як доступного сенсора для реєстрації змін стану контрольної суміші з індивідуальним градуюванням.

У розділі 6 наведено виміряні кількісні результати опублікованих експериментів: приріст ємності бетонних блоків приблизно на 74 % за зміни вмісту вологи від 0 до 11,34 % [16]; результати реєстрації стану бетонних виробів недорогими сенсорами [12]; показники точності градуювання SEN0193 для двох різних класів пористих середовищ [13; 14]. Ці результати становлять перевірену фактологічну основу для оцінювання можливостей системи.

Для невеликого бетонного виробництва доцільно розміщувати датчики в окремій контрольній пробі, вести журнал температури і коду АЦП, а також фіксувати рецептуру, час вимірювання та стан електроніки. Температурні пороги визначає технолог.

Виготовлена на Arduino Nano схема допускає подальше встановлення автономного накопичувача, годинника реального часу, захищених каналів зв'язку й спеціалізованих сенсорів. Конкретні зміни визначають залежно від місця експлуатації та потрібного рівня автоматизації.

Наведені схеми, програмний код, форми контролю та відомості з опублікованих експериментальних праць утворюють практичний комплект для складання, перевірки й експлуатації системи. Показники авторів наукових публікацій відокремлено від чисел, отриманих розрахунком за цими даними.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Analog Devices. DS18B20: Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer : datasheet. URL: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ds18b20.pdf (дата звернення: 12.10.2026).
2. DFRobot. Gravity Analog Capacitive Soil Moisture Sensor (SEN0193) : технічні відомості. URL: https://wiki.dfrobot.com/sen0193 (дата звернення: 12.10.2026).
3. Arduino. Nano : технічні характеристики плати. URL: https://docs.arduino.cc/hardware/nano (дата звернення: 12.10.2026).
4. Adafruit. Adafruit SSD1306 : вихідний код і документація бібліотеки. URL: https://github.com/adafruit/Adafruit_SSD1306 (дата звернення: 12.10.2026).
5. Joint Committee for Guides in Metrology. Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement. JCGM 100:2008. URL: https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_100_2008_E.pdf (дата звернення: 12.10.2026).
6. DFRobot. SEN0193 : calibration example. URL: https://wiki.dfrobot.com/sen0193/docs/18037 (дата звернення: 12.10.2026).
7. Microchip Technology Inc. ATmega48A/PA/88A/PA/168A/PA/328/P : Data Sheet. DS40002061B. URL: https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/MCU08/ProductDocuments/DataSheets/ATmega48A-PA-88A-PA-168A-PA-328-P-DS-DS40002061B.pdf (дата звернення: 14.10.2026).
8. Arduino. analogRead() : reference. URL: https://docs.arduino.cc/language-reference/en/functions/analog-io/analogRead/ (дата звернення: 12.10.2026).
9. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016.
10. Chen W., Shen P., Shui Z. Determination of water content in fresh concrete mix based on relative dielectric constant measurement. Construction and Building Materials. 2012. Vol. 34. P. 306–312. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.073.
11. Wang W., Zhao K., Zhang P., Bao J., Xue S. Application of three self-developed ECT sensors for monitoring the moisture content in sand and mortar. Construction and Building Materials. 2021. Vol. 267. Art. 121008. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121008.
12. Porras R., Mobaraki B., Liu Z., Muñoz T., Lozano F., Lozano J. A. Assessment of Low-Cost Sensors in Early-Age Concrete: Laboratory Testing and Industrial Applications. Applied Sciences. 2025. Vol. 15(15). Art. 8701. DOI: https://doi.org/10.3390/app15158701.
13. Abdelmoneim A. A., Al Kalaany C. M., Khadra R., Derardja B., Dragonetti G. Calibration of Low-Cost Capacitive Soil Moisture Sensors for Irrigation Management Applications. Sensors. 2025. Vol. 25(2). Art. 343. DOI: https://doi.org/10.3390/s25020343.

14. Thelaidjia R., Benkhelifa M., Bassouka-Miatoukantama R. K. et al. Performance of Two Low-Cost Capacitive Soil Moisture Sensors Under Contrasting Texture and Salinity Conditions. Water. 2026. Vol. 18(12). Art. 1431. DOI: https://doi.org/10.3390/w18121431.
15. Cao R., Hu J., Zhang Y., Zhao N., Yue C. Electromagnetic sensing and modeling for cement paste moisture estimation. Measurement. 2025. Vol. 256, Part A. Art. 118097. DOI: https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.118097.
16. Oommen B. A., Philip J. Measurement of moisture contents in concrete blocks using fringing field spiral capacitive sensors. Transactions of the Institute of Measurement and Control. 2023. Vol. 45(8). P. 1484–1491. DOI: https://doi.org/10.1177/01423312221147333 (дата звернення: 26.10.2026).

ДОДАТОК А
ПОВНА ПРОГРАМА КОНТРОЛЕРА

Файл ConcreteMonitor_PrintFinal.ino призначено для Arduino Nano Classic (ATmega328P). У прикладі встановлено температурний поріг 30 °C та гістерезис 1 °C; фактичні параметри задає технолог. Для встановлення використовують бібліотеки OneWire, DallasTemperature, Adafruit_GFX та Adafruit_SSD1306. Роботу електронних модулів перевіряють за процедурами розділу 5.

```
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_GFX.h>
#include <Adafruit_SSD1306.h>
// Дослідний прототип, Arduino Nano Classic, ATmega328P.
// SEN0193 НЕ визначає абсолютну вологість бетонної суміші.
constexpr uint8_t PIN_DS18B20 = 2;    // DATA, 4,7 кОм до +5 В
constexpr uint8_t PIN_SEN0193 = A0;
constexpr uint8_t PIN_LED_GREEN = 3;  // через струмообмежувальний
резистор
constexpr uint8_t PIN_LED_RED = 4;    // через струмообмежувальний
резистор
constexpr uint8_t PIN_PIEZO = 5;      // пасивний малострумовий п'єзоелемент
constexpr uint8_t OLED_ADDRESS = 0x3C;
// ТЕСТОВІ значення. Застосовувати лише погоджений технологом поріг.
constexpr float ALARM_TEMP_C = 30.0f;
constexpr float HYSTERESIS_C = 1.0f;
constexpr unsigned long SAMPLE_PERIOD_MS = 2000UL;
constexpr uint8_t ADC_SAMPLES = 10;
// Увімкнути лише після документованої характеризації та перевірки.
constexpr bool ENABLE_RELATIVE_INDEX = false;
constexpr int CAL_LOW_ADC = 0;
constexpr int CAL_HIGH_ADC = 0;
OneWire oneWire(PIN_DS18B20);
DallasTemperature thermometer(&oneWire);
Adafruit_SSD1306 display(128, 64, &Wire, -1);
bool oledInitialized = false;
bool tempAlarmLatched = false;
bool oledResponds() {
  Wire.beginTransmission(OLED_ADDRESS);
  return Wire.endTransmission() == 0; // Відповідь I2C, не тест якості
зображення.
```

```
}
int readMeanADC() {
  unsigned long sum = 0;
  for (uint8_t i = 0; i < ADC_SAMPLES; ++i) {
    sum += analogRead(PIN_SEN0193);
    delay(3);
  }
  return int((sum + ADC_SAMPLES / 2) / ADC_SAMPLES);
}
bool canUseIndex() {
  return ENABLE_RELATIVE_INDEX &&
         CAL_LOW_ADC >= 0 && CAL_LOW_ADC <= 1023 &&
         CAL_HIGH_ADC >= 0 && CAL_HIGH_ADC <= 1023 &&
         CAL_LOW_ADC != CAL_HIGH_ADC;
}
float relativeIndex(int adc) {
  const float val = 100.0f * float(adc - CAL_LOW_ADC) /
                    float(CAL_HIGH_ADC - CAL_LOW_ADC);
  return constrain(val, 0.0f, 100.0f);
}
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(PIN_LED_GREEN, OUTPUT);
  pinMode(PIN_LED_RED, OUTPUT);
  pinMode(PIN_PIEZO, OUTPUT);
  digitalWrite(PIN_LED_GREEN, LOW);
  digitalWrite(PIN_LED_RED, LOW);
  noTone(PIN_PIEZO);
  thermometer.begin();
  thermometer.setResolution(12); // до 750 мс у 12-бітному режимі
  Wire.begin();
  if (oledResponds()) {
    oledInitialized = display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC,
                                    OLED_ADDRESS, true, false);
  }
  if (oledInitialized) {
    display.clearDisplay();
    display.setTextSize(1);
    display.setTextColor(SSD1306_WHITE);
    display.display();
  }
  Serial.println(F("# firmware=ConcreteMonitor_PrintFinal;prototype_only"));
```

```
Serial.println(F("uptime_ms;temp_C;sen_adc;index_rel;temp_status;sen_diag;disp
lay_status"));
}
void loop() {
  const unsigned long cycleStart = millis();
  thermometer.requestTemperatures();
  const float t = thermometer.getTempCByIndex(0);
  const bool tempOK = (t != DEVICE_DISCONNECTED_C) &&
                      (t >= -55.0f) && (t <= 125.0f);
  const int adc = readMeanADC();
  const bool adcEdge = (adc <= 2 || adc >= 1021);
  const bool adcOutsideExpected = (adc > 660); // За Vref близько 5 В;
  // діапазон сенсора до ~3 В; 660 - лише діагностичний запас.
  const bool indexReady = canUseIndex();
  const bool displayOK = oledInitialized && oledResponds();
  if (tempOK) {
    if (t > ALARM_TEMP_C) tempAlarmLatched = true;
    else if (t < ALARM_TEMP_C - HYSTERESIS_C)
      tempAlarmLatched = false;
  }
  const bool fault = !tempOK || !displayOK;
  const bool alarm = fault || tempAlarmLatched;
  digitalWrite(PIN_LED_GREEN, alarm ? LOW : HIGH);
  digitalWrite(PIN_LED_RED, alarm ? HIGH : LOW);
  if (fault) tone(PIN_PIEZO, 1000);
  else if (tempAlarmLatched) tone(PIN_PIEZO, 2000);
  else noTone(PIN_PIEZO);
  const char *tempStatus = !tempOK ? "T_ERROR" :
                           tempAlarmLatched ? "T_HIGH" : "T_OK";
  const char *senDiag = adcOutsideExpected ? "ADC_RANGE_REVIEW" :
                        adcEdge ? "ADC_EDGE_REVIEW" : "ADC_READING";
  const char *oledStatus = displayOK ? "OLED_ACK" : "OLED_NO_ACK";
  Serial.print(millis()); Serial.print(';');
  if (tempOK) Serial.print(t, 2);
  else Serial.print(F("NA"));
  Serial.print(';'); Serial.print(adc); Serial.print(';');
  if (indexReady) Serial.print(relativeIndex(adc), 1);
  else Serial.print(F("NA"));
  Serial.print(';'); Serial.print(tempStatus);
  Serial.print(';'); Serial.print(senDiag);
  Serial.print(';'); Serial.println(oledStatus);
  if (displayOK) {
    display.clearDisplay();
```

```
    display.setCursor(0, 0); display.print(F("CONCRETE PILOT"));
    display.setCursor(0, 13); display.print(F("TEMP: "));
    if (tempOK) { display.print(t, 1); display.print(F(" C")); }
    else display.print(F("ERROR"));
    display.setCursor(0, 26); display.print(F("SEN ADC: "));
    display.print(adc);
    display.setCursor(0, 39); display.print(F("REL INDEX: "));
    if (indexReady) display.print(relativeIndex(adc), 1);
    else display.print(F("OFF"));
    display.setCursor(0, 52);
    if (!tempOK) display.print(F("T SENSOR ERROR"));
    else if (tempAlarmLatched) display.print(F("TEMP ALARM"));
    else if (adcOutsideExpected || adcEdge)
      display.print(F("CHECK SEN ADC"));
    else display.print(F("T CHANNEL OK"));
    display.display();
  }
  const unsigned long elapsed = millis() - cycleStart;
  if (elapsed < SAMPLE_PERIOD_MS)
    delay(SAMPLE_PERIOD_MS - elapsed);
}
```

ДОДАТОК Б
ЖУРНАЛ ЩОЗМІННОЇ ПЕРЕВІРКИ

Таблиця Б.1. Журнал щозмінної перевірки системи

Дата, зміна, оператор	Контрольна точка / номер зразка	Температура приладу та контрольна	ADC, стан, підпис

У записі має бути зазначено, чи відносний індекс було вимкнено (NA), чи використано власні калібрувальні точки. Цифровий сигнал ADC записують без позначення «% вологості бетону».

ДОДАТОК В
ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КАНАЛІВ І ДОСЛІДНОГО ГРАДУЮВАННЯ

Таблиця В.1. Протокол перевірки каналів і дослідного градуювання

Реквізит	**Значення**
Дата та місце контролю	
Модель Arduino Nano / ID приладу	
Модель і ID DS18B20 / SEN0193	
Рецептура, склад, температура проби	
Глибина, напрям і тривалість контакту SEN0193	
Контрольний метод / незалежний прилад	
Визначені опорні значення CAL_LOW_ADC, CAL_HIGH_ADC	
Кількість повторів і спостережений розкид	
Підстава для ввімкнення ENABLE_RELATIVE_INDEX	□ так □ ні Обґрунтування: _____

ДОДАТОК Г
КАРТКА РЕЄСТРАЦІЇ НЕСПРАВНОСТІ

Таблиця Г.1. Облік несправностей і коригувальних дій

Дата і час	**Ознака / код стану**	Виконані перевірки	**Результат, відповідальний**

ДОДАТОК Д
ПАСПОРТ ПРИСТРОЮ ТА ОБЛІК ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПЕРЕВІРОК

Таблиця Д.1. Паспортні дані й результати контролю готовності пристрою

Параметр	**Заповнює відповідальна особа**
Інвентарний № / дата складання	
Контрольна точка / місце встановлення	
Програма та дата її завантаження	ConcreteMonitor_PrintFinal.ino /
Встановлений температурний поріг	_____ °C; погодив _____
Відносний індекс SEN0193	□ OFF □ ON, протокол налаштування № _____
Перевірка температурного каналу DS18B20	_____
Кабелі / корпус / живлення оглянуто	□ Так □ Ні; зауваження _____
Наявність робочого журналу CSV на ПК	□ Так □ Ні; папка _____
Рішення щодо використання у контрольній точці	□ Допустити □ Не допускати
Відповідальний / підпис / дата	_____

Примітка: допуск стосується лише спостереження в погодженій контрольній точці. Він не засвідчує придатності системи для регулювання рецептури, офіційного контролю якості бетону або промислового керування обладнанням.

ДОДАТОК Е
ПРОГРАМА ЗБЕРЕЖЕННЯ USB-ДАНИХ НА ПК

Робочий файл: ConcreteMonitor_Logger_PrintFinal.py. Програма приймає текстовий потік через USB, додає календарну мітку ПК, перевіряє кількість і типи полів та записує CSV. Залежності: Python 3 і pyserial. Програма не відновлює записи, втрачені через відключення живлення чи USB.

```
"""Архівування телеметрії Arduino Nano у CSV з часовою міткою ПК.

Пуск: python -m pip install pyserial
      python ConcreteMonitor_Logger_PrintFinal.py COM5

Заголовки, повторно надіслані Nano, не записуються вдруге.
"""
import csv
import pathlib
import sys
from datetime import datetime
import serial
FIELDS = ["uptime_ms", "temp_C", "sen_adc", "index_rel",
          "temp_status", "sen_diag", "display_status"]
T_STATES = {"T_OK", "T_HIGH", "T_ERROR"}
A_STATES = {"ADC_READING", "ADC_EDGE_REVIEW",
"ADC_RANGE_REVIEW"}
O_STATES = {"OLED_ACK", "OLED_NO_ACK"}
def valid(values):
    if len(values) != len(FIELDS) or not values[0].isdigit():
        return False
    try:
        adc = int(values[2])
        if not 0 <= adc <= 1023:
            return False
        if values[1] != "NA" and not -55 <= float(values[1]) <= 125:
            return False
        if values[3] != "NA" and not 0 <= float(values[3]) <= 100:
            return False
    except ValueError:
        return False
    return (values[4] in T_STATES and values[5] in A_STATES
            and values[6] in O_STATES)
def main():
    if len(sys.argv) != 2:
        print("Потрібен COM-порт: python ConcreteMonitor_Logger_PrintFinal.py
COM5")
        return 2
```

```
    path = pathlib.Path("concrete_log_" +
                        datetime.now().strftime("%Y%m%d_%H%M%S") + ".csv")
    n = 0
    previous_uptime = None
    previous_rx = None
    try:
        with serial.Serial(sys.argv[1], 9600, timeout=3) as connection, \
             path.open("w", newline="", encoding="utf-8-sig") as output:
            writer = csv.writer(output, delimiter=";")
            writer.writerow(["pc_datetime_iso"] + FIELDS)
            output.flush()
            print("Запис у", path.resolve(), "(Ctrl+C для зупинки)")
            while True:
                raw = connection.readline().decode("ascii", errors="replace").strip()
                if not raw or raw.startswith("#") or raw.startswith("uptime_ms;"):
                    continue
                values = raw.split(";")
                if not valid(values):
                    print("Відкинуто некоректний рядок:", raw)
                    continue
                now = datetime.now().astimezone()
                uptime = int(values[0])
                if previous_uptime is not None and uptime < previous_uptime:
                    print("УВАГА: зменшення uptime; перезапуск або переповнення
millis().")
                if previous_rx is not None:
                    dt = (now - previous_rx).total_seconds()
                    if dt > 5.0:
                        print("УВАГА: пауза надходження даних", round(dt, 2), "с")
                writer.writerow([now.isoformat(timespec="milliseconds")] + values)
                output.flush()
                previous_uptime, previous_rx = uptime, now
                n += 1
    except KeyboardInterrupt:
        print("Зупинено. Рядків:", n)
        return 0
    except (OSError, serial.SerialException) as exc:
        print("Помилка порту/файлу:", exc, "; можливі пропуски даних.")
        return 1
if __name__ == "__main__":
    sys.exit(main())
```

ДОДАТОК Ж
АКТ ПРИЙМАННЯ ТА ЗВІРЯННЯ КОМПЛЕКТУ

Дата: _____ Підприємство: _____ Об’єкт: _____

Таблиця Ж.1. Відомість комплектності апаратно-програмного комплексу

№	Елемент	Модель / серійний №	Кількість	Стан / примітка
1	Arduino Nano Classic			
2	DS18B20 у захисному зонді			
3	DFRobot SEN0193			
4	OLED SSD1306 128×64 I²C			
5	П’єзо, 2 LED, резистори			
6	Корпус, кабелі, джерело 5 В			

Результат комплектування: □ повний □ неповний.

Приймав _____.

ДОДАТОК И
ПОВНИЙ ПРОТОКОЛ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ВИПРОБУВАНЬ FAT/SAT

Об’єкт / номер системи: _____ Версія коду: _____
Контрольна точка: _____ Поріг: _____ °C; гістерезис: _____ °C

Таблиця И.1. Реєстрація результатів стендових випробувань FAT

ID	**Результат (ФАКТ)**	Підтверджувальний запис або знімок екрана	**Підпис**
F01	□ Пройдено □ Ні		
F02	□ Пройдено □ Ні		
F03	□ Пройдено □ Ні		
F04	□ Пройдено □ Ні		
F05	□ Пройдено □ Ні		
F06	□ Пройдено □ Ні		
F07	□ Пройдено □ Ні		
F08	□ Пройдено □ Ні		
F09	□ Пройдено □ Ні		
F10	□ Пройдено □ Ні		

SAT:
□ Пройдено □ Не пройдено. Рішення: □ Допустити до дослідного застосування □ Відкласти.
Причини відмови / коригувальні заходи: _____
Відповідальний: _____ Дата: _____

ДОДАТОК К
РЕЄСТР ЗМІН ПРОГРАМИ ТА ПАРАМЕТРІВ СИГНАЛІЗАЦІЇ

Таблиця К.1. Реєстр змін вбудованої програми та порогів

Дата	Версія коду	Поріг/гістерезис	Причина зміни	FAT тест	Підпис

Після зміни коду або калібрувальних констант виконати щонайменше повторний функціональний тест і зберегти попередню версію для аналізу несправностей.

ДОДАТОК Л
КАРТКА ПАРТІЇ / КОНТРОЛЬНОЇ ПРОБИ

Таблиця Л.1. Паспорт контрольної проби бетонної суміші

Поле	**Заповнюється оператором або технологом**
Дата, час, партія, місце	
Тип і рецептура бетонної суміші	
Початковий час змішування	
Параметри зразка / об’єм / тара	
Положення DS18B20	
Положення SEN0193 / глибина	
Версія коду, температурний поріг	
Файл CSV та місце архівування	
Незалежний метод оцінки параметрів	
Підпис відповідального	

ДОДАТОК М
ГЛОСАРІЙ ТЕХНІЧНИХ ТЕРМІНІВ

Таблиця М.1. Основні поняття й визначення

Термін	**Значення у цьому документі**
ADC / код АЦП	Безрозмірне число 0…1023, отримане з входу A0.
Relative index	Умовна безрозмірна шкала, прив’язана до двох установлених опорних станів.
T_ERROR	Несправне або недостовірне зчитування температурного каналу.
Hysteresis / гістерезис	Різниця між порогом увімкнення та відпускання температурної тривоги.
FAT	Внутрішнє приймальне функціональне випробування на столі.
SAT	Внутрішнє випробування на фактичній контрольній точці.
CSV	Текстовий формат табличних даних із роздільником «;».
В/Ц	Водоцементне відношення; не вимірюється SEN0193.
Контрольний термометр	Незалежний перевірений засіб вимірювання для звірення температури.
Калібрувальна проба	Зразок, застосований для побудови модельної залежності.
Перевірочна проба	Інша проба, що не використовувалася у побудові моделі.

Електронне видання

СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ТЕМПЕРАТУРИ БЕТОННОЇ СУМІШІ ТА РЕЄСТРАЦІЇ СИГНАЛУ ЄМНІСНОГО СЕНСОРА

Методичні рекомендації

Науково-методичне видання

Апаратно-програмний комплекс на базі
Arduino Nano, DS18B20, SEN0193 та OLED SSD1306

Кухарчук Р. П., Рябко А. В., Заїка О.В., Качурик І.І., Кугай Н.В.,
Сухойваненко Л.Ф., Шелудько В.І.

Підп. до розповсюдження 4.11.2026.
Формат 60x84/16. Умов. друк. арк. 2,96. Зам. №3595
Облік.-вид. арк. 1,52. Папір офсетний. Гарнітура Таймс.
Видавництво Глухівського національного педагогічного
університету імені Олександра Довженка
41400, м. Глухів, Сумська обл., вул. Київська, 24
тел/факс (05444) 2-33-06.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи СМв №046 від 16 червня 2014 року