

ХЕРСОНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ТРАНСПОРТУ

КАФЕДРА АВТОМАТИЗАЦІЇ, РОБОТОТЕХНІКИ І МЕХАТРОНИКИ

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи магістра

на тему: «Комп'ютерно-інтегрована система технічного контролю
залізобетонних виробів»

«Computer-Integrated System for Technical Control
of Reinforced Concrete Products»

Виконав: студент 6 курсу, групи 6А
спеціальності 174 – «Автоматизація, комп'ютерно-
інтегровані технології та робототехніка
освітньо-професійної програми – «Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології»
Сердюк О.С.

Керівник: к.т.н., доцент Лебеденко Ю.О.

Рецензент _____

(прізвище та ініціали)

Херсон – 2025 рік

Херсонський національний технічний університет

Факультет Інженерії та транспорту
Кафедра Автоматизації, робототехніки і мехатроніки
Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр
Спеціальність 174 – «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»
Освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри автоматизації,
робототехніки і мехатроніки

Селіверстов І.А.

«___» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу студенту

Сердюку Олександрю Сергійовичу

1. Тема проекту: Комп'ютерно-інтегрована система технічного контролю залізобетонних виробів

Computer-Integrated System for Technical Control of Reinforced Concrete Products

керівник проекту: к.т.н., доцент Лебеденко Ю.О.

затверджена наказом вищого навчального закладу від 28.08.2025 р. № 364-с

2. Строк подання студентом проекту «10» грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до проекту: Дослідити методи та засоби підвищення ефективності процесів технічного контролю залізобетонних виробів

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки 1) Аналіз методів та засобів контролю якості бетонних виробів 2) Математичне обґрунтування методу контролю структуроутворення бетону за його електропровідністю 3) Розробка комп'ютерно інтегрованої системи контролю якості бетону

5. Перелік графічного матеріалу 1) Схема технологічна; 2) Схема електрична структурна; 3) Нечіткий регулятор; 4) Екстрематор. Схема електрична принципова ; 5) Характеристики бетонної суміші; 6) Методи контролю якості бетону; 7) Програмне забезпечення

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Основна частина	Лебеденко Ю.О., к.т.н., доцент		

7. Дата видачі завдання _____ « 5 » жовтня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Літературний огляд	15.10.25	
2	Аналіз методів та засобів контролю якості бетонних виробів	25.10.25	
3	Математичне обґрунтування методу контролю структуроутворення бетону за його електропровідністю	01.11.25	
4	Розробка комп'ютерно_інтегрованої системи контролю якості бетону	15.11.25	
5	Обробка результатів	20.11.25	
6	Висновки по роботі	25.11.25	
7	Оформлення ПЗ і креслень	05.12.25	

Студент

Сердюк О.С.

(підпис)

Керівник проекту

Лебеденко Ю.О.

(підпис)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра: 110 сторінок, 19 рисунків, 7 таблиць, 4 додатки. Графічна частина – 7 аркушів формату А1.

Кваліфікаційна робота магістра присвячена розробці комп'ютерно-інтегрованої системи контролю якості бетонної суміші. Проведено аналіз недоліків існуючих систем, які використовують методи зміни знаку похідної електропровідності.

Розглянуто теоретичні основи контролю структуроутворення бетону за його електропровідністю. Для мінімізації впливу технологічного та електронного шуму, що спотворює сигнал, запропоновано використання нечіткої моделі екстрематора.

На основі отриманих результатів розроблено комп'ютерно-інтегровану систему автоматизованого керування. Визначено технічні засоби для реалізації контролю та регулювання параметрів процесу, включаючи використання мікроконтролера STM32. Розроблено програмне забезпечення, що реалізує функції належності та базу нечітких правил. Результати дослідження можуть бути застосовані для автоматизації процесів контролю якості в технологіях виробництва залізобетонних конструкцій.

КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНА СИСТЕМА, ЕКСТРЕМАТОР, НЕЧІТКА ЛОГІКА, ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ БЕТОНУ, ЯКІСТЬ, СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ.

					<i>ХНТУ174.КРМ.25.11 РФ</i>			
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	<i>Реферат</i>	<i>Літ.</i>	<i>Лист</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Розроб.</i>		<i>Сердюк О.С.</i>					1	3
<i>Перевір.</i>		<i>Лебеденко Ю.О.</i>						
<i>Реценз.</i>								
<i>Н. Контр.</i>		<i>Сарафаннікова</i>						
<i>Затверд.</i>		<i>Селіверстов І.А.</i>				<i>ХНТУ, зр.6А</i>		

THE ABSTRACT

Qualification master's work: 110 pages, 19 figures, 7 tables, 4 appendices. A graphic part – 7 sheets of a format A1.

The Master's qualification thesis is dedicated to the development of a computer-integrated system for controlling the quality of concrete mix. An analysis of the shortcomings of existing systems that utilize methods based on the sign change of the electrical conductivity derivative was conducted.

The theoretical foundations for controlling concrete structure formation based on its electrical conductivity were examined. To minimize the influence of technological and electronic noise that distorts the signal, the use of a fuzzy extremum model (or fuzzy extremator) was proposed.

Based on the obtained results, a computer-integrated automated control system was developed. Technical means for implementing process parameter monitoring and control were determined, including the use of the microcontroller STM32. Software was developed that implements membership functions and a fuzzy rule base. The research results can be applied to the automation of quality control processes in reinforced concrete production technologies.

COMPUTER-INTEGRATED SYSTEM, EXTREMATOR, FUZZY LOGIC,
CONCRETE ELECTRICAL CONDUCTIVITY, QUALITY, STRUCTURE
FORMATION

					ХНТУ174.КРМ.25.11 РФ	Лист
Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата		2

2	МАТЕМАТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДУ КОНТРОЛЮ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ БЕТОНУ ЗА ЙОГО ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЮ.....	36
2.1	Теоретичні основи контролю структуроутворення бетону з його електропровідності.....	36
2.2	Нечіткий підхід до визначення моменту екстремуму на кривій електропровідності.....	58
2.2.1	Структура нечіткого екстрематора.....	60
2.2.2	Функції належності вхідних змінних.....	61
2.2.3	Функції належності вхідних змінних.....	62
2.2.4	База нечітких правил.....	65
2.2.5	Механізм виведення.....	66
2.3	Висновки до розділу 2	67
3	РОЗРОБКА КОМП'ЮТЕРНО_ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ БЕТОНУ	68
3.1	Розробка структури системи.....	68
3.2	Опис елементної бази системи	70
3.2.1	Мікроконтролер STM32F407VGT6.....	70
3.2.2	Інструментальний підсилювач INA333	71
3.2.3	Датчик електропровідності	72
3.2.4	OLED дисплей	73
3.2.5	Інші компоненти.....	73
3.3	Розробка принципової схеми системи	74
3.4	Розробка алгоритму роботи системи	75
3.5	Розробка програмного забезпечення.....	80
3.5.1	Реалізація функцій належності	80
3.5.2	База нечітких правил.....	81
3.5.3	Функція нечіткого виведення	81
3.5.4	Методика передискретизації АЦП.....	82

3.6 Експериментальні дослідження.....	82
3.7 Висновки до розділу 3	84
ВИСНОВКИ.....	86
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	87
ДОДАТОК А ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДАНІ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ЕКСТРЕМАТОРА	93
ДОДАТОК Б СХЕМА ЕЛЕКТРИЧНА ПРИНЦИПОВА	96
ДОДАТОК В БЛОК-СХЕМА АЛГОРИТМУ РОБОТИ.....	97
ДОДАТОК Г ЛІСТИНГ ПРОГРАМИ.....	98

карт, що візуалізують теплові аномалії. Такий підхід є надзвичайно ефективним для виявлення внутрішніх дефектів структури, контролю рівномірності прогріву під час термообробки, виявлення зон з підвищеною вологістю, а також оцінки теплоізоляційних властивостей матеріалу.

Серед переваг теплофізичних методів варто відзначити їхню безконтактність (особливо в контексті інфрачервоної термографії), можливість візуалізації результатів у зручному для інтерпретації форматі, а також здатність охоплювати великі площі обстеження. Крім того, ці методи вирізняються відносною простотою реалізації в умовах будівельного майданчика або лабораторії. Водночас існують і певні обмеження. Зокрема, результати можуть суттєво залежати від зовнішніх теплових впливів, що ускладнює кількісну інтерпретацію даних. Також важливо враховувати вплив умов навколишнього середовища, які можуть змінювати теплову поведінку матеріалу та спотворювати результати вимірювань.

У підсумку, теплофізичні методи є ефективним інструментом для моніторингу процесів твердіння та оцінки якості бетонних конструкцій, особливо на ранніх стадіях формування структури. Їхнє застосування дозволяє підвищити точність контролю та своєчасно виявляти потенційні дефекти, що є важливою умовою забезпечення довговічності та надійності будівельних об'єктів.

1.6 Оптичні та геометричні методи контролю

1.6.1 Оптичні методи

Оптичні методи неруйнівного контролю базуються на використанні фізичних властивостей світлового випромінювання для оцінки геометричних характеристик та стану поверхні виробів. Завдяки високій чутливості до змін форми, положення та текстури, ці методи широко

будівельна галузь володіє широким спектром методів, які класифікуються за принципом дії, точністю, швидкістю реагування та придатністю до автоматизації, причому кожен має свої переваги й обмеження. Особливу актуальність для промислового застосування набувають неруйнівні методи, адже вони дозволяють здійснювати моніторинг без пошкодження виробів, забезпечуючи безперервність технологічного процесу та зниження ризику браку. Найбільш перспективними для автоматизованих систем є електрофізичні методи, зокрема контроль електропровідності бетонної суміші, що відображає фізико-хімічні процеси структуроутворення, чітко фіксує критичні моменти та легко інтегрується в цифрові системи. Контроль ранніх етапів тверднення дозволяє оптимізувати виробничий цикл і підвищити міцність виробів на 30–50 %, скоротити тривалість процесу в 2–3 рази та зекономити до 15 % цементу. Отримані висновки підтверджують доцільність розробки системи технічного контролю на електрофізичних принципах, здатної забезпечити високий рівень автоматизації та ефективність виробництва.

					<i>ХНТУ174.КРМ.25.11 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		35

конденсаторах), особливо за наявності підвищеної вологості та електромагнітних завад.

Більш точними та надійними є екстрематори, що реалізують цифрову обробку сигналу. У таких системах крива електропровідності перетворюється на сукупність цифрових значень, які зберігаються та аналізуються за допомогою цифрових пристроїв пам'яті та порівняння. Ці пристрої легко програмуються на виявлення екстремумів різних типів.

Відтак, завдання розробки математичного апарату для екстрематора полягає у створенні алгоритму та програмного коду цифрового обчислювального блоку, здатного за двома характерними ознаками класифікувати вхідні сигнали відповідно до стану кривої – до настання екстремуму та після нього.

Нехай маємо криву розподілу певних значень, зокрема залежність електропровідності бетонної суміші від часу, що представлена на рисунку 2.3.

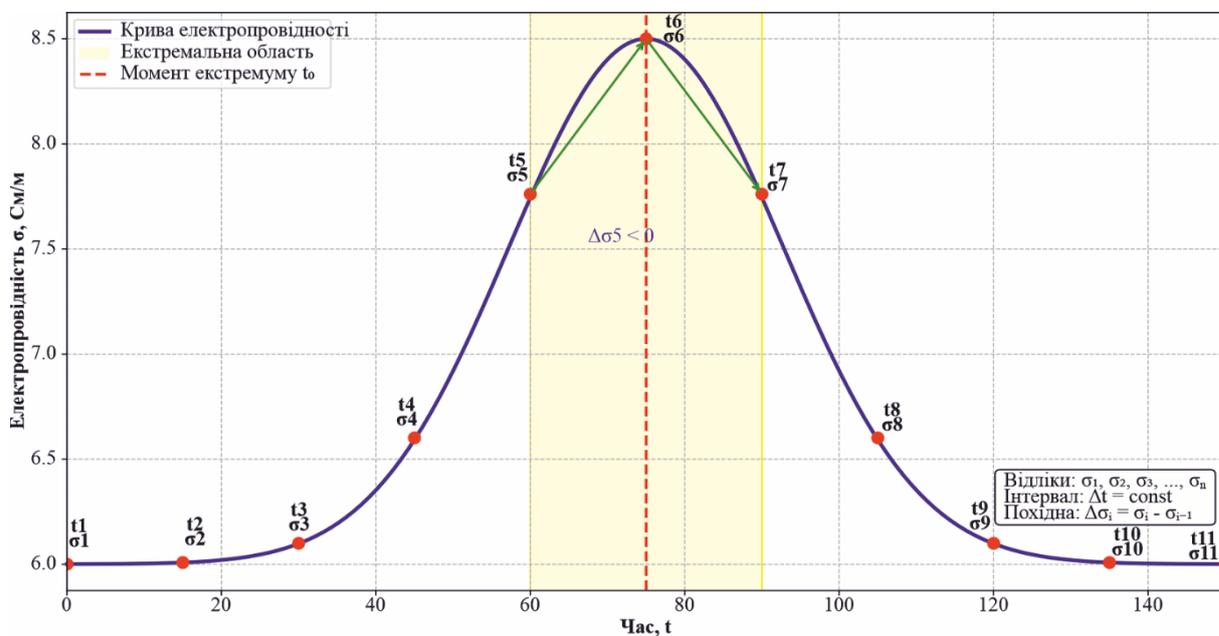


Рисунок 2.3 – Формування сукупності ознак по кривій з екстремальною областю

$$p(e) = \frac{1}{2} \left[\int_{x_0}^{\infty} f_1(x) dx + \int_{-\infty}^{x_0} f_2(x) dx \right] \quad (2.8)$$

де x_0 – поріг, встановлений за генеральними сукупностями (справжніми розподілами) значень ознак.

Іноді доцільно замість прямого інтегрування розподілу ознак застосовувати способи непрямой оцінки ймовірності помилки, одним із яких є метод інтегрування відношення правдоподібності.

Введемо поняття відношення правдоподібності:

$$\Lambda = \frac{f[x/A_1]}{f[x/A_2]} \quad (2.9)$$

Якщо об'єкт, що розпізнається, відноситься до першого класу, то ставлення правдоподібності розподілене деяким цілком певним чином. Щільність такого розподілу позначимо $f_1(\Lambda)$. За умови, що об'єкт відноситься до другого класу, густина розподілу якого $f_2(\Lambda)$. Звідси ймовірність помилки при розпізнаванні об'єктів першого класу дорівнює

$$p_1(e) = \int_{-\infty}^q f_1(\Lambda) d\Lambda \quad (2.10)$$

а другого класу

$$p_2(e) = \int_q^{\infty} f_2(\Lambda) d\Lambda \quad (2.11)$$

Ймовірність помилки розпізнавання обох класів складає

$$p(e) = \sum_{i=1}^2 P[A] p_i(e) \quad (2.12)$$

Визначимо ймовірність помилки розпізнавання двох класів об'єктів, розподіл ознак яких описуються нормальними законами $N(\mu_1, V)$ і $N(\mu_2, V)$, де $\mu_i, i=1,2$ – вектор середнього значення ознак i -го класу, а V – ковариационна матриця однакова обох класів. Щільність розподілу значень ознак i класу дорівнює

$$f[x/A] = (2\pi)^{-\frac{1}{2}N} |V|^{-\frac{1}{2}} e^{-\frac{1}{2}(x-\mu_i)'V^{-1}(x-\mu_i)} \quad (2.13)$$

де $|V|$ – визначник матриці V ; V^{-1} – матриця зворотна V ; $(x-\mu_i)'$ – Вектор транспонований щодо $(x-\mu_i)$.

Відношення правдоподібності в даному випадку

$$\Lambda = \frac{f[x/A_1]}{f[x/A_2]} = e^{\left[\frac{1}{2}(x-\mu_2)'V^{-1}(x-\mu_2) - \frac{1}{2}(x-\mu_1)'V^{-1}(x-\mu_1) \right]} \quad (2.14)$$

У разі нормальних розподілів зручно користуватися не ставленням правдоподібності, а його логарифмом

$$\ln \Lambda = x'V^{-1}(\mu_1 - \mu_2) - \frac{1}{2}(\mu_1 + \mu_2)'V^{-1}(\mu_1 - \mu_2) \quad (2.15)$$

Якщо об'єкт відноситься до першого класу $[x \text{ розподілено } N(\mu_1, V)]$, то логарифм відносини правдоподібності розподілено нормально з математичним очікуванням

$$M = \frac{1}{2}(\mu_1 - \mu_2)' V^{-1}(\mu_1 - \mu_2) = \frac{1}{2}\alpha \quad (2.16)$$

та дисперсією

$$D = (\mu_1 - \mu_2)' V^{-1}(\mu_1 - \mu_2) = \alpha \quad (2.17)$$

де α - дивігенція, що визначається як міра проблеми поділу двох класів за заданими ознаками. Якщо об'єкт відноситься до другого класу $[x \text{ розподілений } N(\mu_2, V)]$, то $\ln \Lambda$ розподілений нормально з тією ж дисперсією, що і в першому випадку, і з математичним очікуванням

$$M_2 = -\frac{1}{2}(\mu_1 - \mu_2)' V^{-1}(\mu_1 - \mu_2) = -\frac{1}{2}\alpha \quad (2.18)$$

Таким чином, є два нормальні розподіли $N\left(\frac{1}{2}\alpha; \alpha\right)$ і $N\left(-\frac{1}{2}\alpha; \alpha\right)$, що перетинаються в одній точці. Якщо вважати, що $P[A_1] = P[A_2]$, то ймовірність помилки становитиме

$$p(e) = \int_{\frac{1}{2}\sqrt{\alpha}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}y^2} dy \quad (2.19)$$

Мінімум $P(e)$ забезпечує «критерій ідеального спостерігача». Цей критерій вимагає вибору такого значення X_0 , при якому виконується рівність

$$P[A_1] f_1(x_0) = P[A_2] f_2(x_0) \quad (2.21)$$

Часто використовується дещо інша форма запису, за допомогою відношення правдоподібності

$$\Lambda(x) = \frac{f(x/x_1)}{f(x/x_2)}; \quad \Lambda(x_0) = \Lambda_0 = \frac{f_1(x_0)}{f_2(x_0)} \quad (2.22)$$

Відношення правдоподібності, очевидно, є функцією X і критерій може характеризуватись граничним значенням Λ_0 . Для критерію ідеального спостерігача

$$\Lambda_0 = \frac{P[A_2]}{P[A_1]} \quad (2.23)$$

Гіпотеза h_1 про належність об'єкта до класу A_1 приймається за $\Lambda(x) < \Lambda_0$, а гіпотеза h_2 – за $\Lambda(x) > \Lambda_0$.

Умови ймовірності гіпотез визначаються з виразів

$$\left. \begin{aligned} p(h_1/x) &= \frac{P[A_1] f(x/x_1)}{f(x)} \Big|_{\max} \\ p(h_2/x) &= \frac{P[A_2] f(x/x_2)}{f(x)} \Big|_{\max} \end{aligned} \right\} \quad (2.24)$$

де $f(x) = P[A_1] f(x/x_1) + P[A_2] f(x/x_2)$ - густина ознаки при всіх актах розпізнавання, $f(x/x_1); f(x/x_2)$ - функції правдоподібності.

З цих виразів випливає, що

$$\frac{p(h_1/x_0)}{p(h_2/x_0)} = 1 \quad (2.25)$$

Таким чином, критерій ідеального спостерігача вимагає приймати рішення на користь тієї гіпотези, ймовірність якої в цьому акті найбільшого розпізнавання. Наприклад, приймається гіпотеза h_1 , якщо

$$\frac{p(h_1/x)}{p(h_2/x)} > 1 \quad (2.26)$$

Отже, алгоритм вирішальної схеми має реалізовувати це співвідношення з урахуванням попередньої рівності.

Для зниження помилки класифікації об'єкта застосовується метод нагромадження. Його сутність полягає в тому, що рішення приймається не за одним відліком, а за кількома. Це відповідає тому, що розпізнавання за n відліками еквівалентно розпізнаванню по одному відліку деякої множини n незалежних ознак.

Якісно ймовірність помилки розпізнавання від кількості незалежних відліків можна оцінити так. Імовірність помилки розпізнавання за одним відліком при двох класах дорівнює.

$$p(e) = \min \{ P[A_1/x_j]; P[A_2/x_j] \} \quad (2.27)$$

$$\frac{P[A_1/x_j]}{P[A_2/x_j]} = \frac{P[A_1] \int f(x_k/A_1) dV}{P[A_2] \int f(x_k/A_2) dV} = \frac{P[A_1]}{P[A_2]} \Lambda_k \quad (2.28)$$

логіка дозволяє формалізувати експертні знання, забезпечує гнучкість і стійкість до завад, що робить її більш придатною для реальних умов виробництва.

Таким чином, нечітка логіка пропонує альтернативний, робастний і більш інтуїтивний математичний апарат для побудови «екстрематора», який безпосередньо працює з невизначеністю та якісними змінами в зашумленому повільному процесі, як того вимагає задача визначення стану бетону.

Обидва методи можуть бути успішно реалізовані в цифровому обчислювальному пристрої екстрематора. Вибір між ними залежить від пріоритетів конкретної задачі: якщо критична формальна оцінка надійності – використовується статистичний метод; якщо важлива гнучкість та інтерпретовність – нечіткий.

2.2.1 Структура нечіткого екстрематора

Нечітка модель буде використовувати два основні вимірювані параметри як вхідні змінні та визначить один керуючий сигнал як вихідну змінну (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Нечіткі змінні

Елемент	Призначення	Опис
Вхідна 1 $\Delta g = \Delta g_n - g_{n-1}$	Зміна провідності (перша похідна)	Ознака швидкості зміни стану.
Вхідна 2 Δg_{trend}	Накопичений тренд провідності	Ознака загальної поведінки, що ігнорує короткочасний шум.
Вихід $A(t_0)$	Ступінь проходження екстремуму	Керуючий сигнал для вібратора.

до +0.8 См/м), що дозволяє поглинати короточасні стрибки провідності, спричинені деструктивними процесами в бетоні, не змінюючи при цьому загальної оцінки стану процесу.

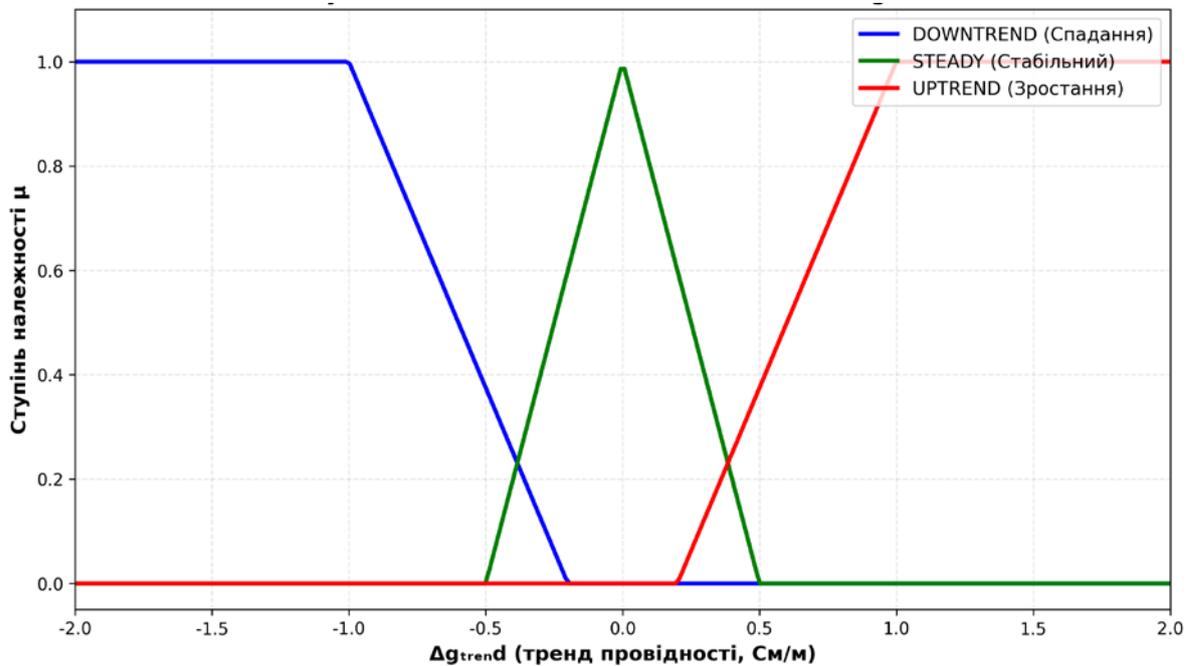


Рисунок 2.7 – Функції належності для входньої змінної Δg_{trend}

Тренд Δg_{trend} може бути обчислений як зважене середнє або просте середнє Δg за останні K відліків (наприклад, $K=10$, як і в статистичному підході). Це забезпечує нечітку фільтрацію шуму (табл. 2.4).

Таблиця 2.4 – Терми входньої величини 2

Лінгвістичний терм	Призначення	Функція належності (приклад)
DOWNTREND	Тенденція спадання	Трапеція
STEADY	Тренд близько нуля	Трикутник
UPTREND	Тенденція зростання	Трапеція

2.2.3 Функції належності входніх змінних

Тренд Δg_{trend} обчислюється як ковзне середнє за останні K відліків:

2.2.4 База нечітких правил

База правил є серцем нечіткого екстрематора. Вона містить експертні знання про поведінку процесу в околі екстремуму, формалізовані у вигляді продукційних правил типу IF-THEN.

Загальна форма правила:

$$IF (\Delta g \text{ is } A) \text{ AND } (\Delta g_{trend} \text{ is } B) \text{ THEN } (A(t_0) \text{ is } C) \quad (2.42)$$

де $A \in \{\text{NEG_HIGH, NEG_SLOW, ZERO, POS_SLOW, POS_HIGH}\};$

$B \in \{\text{DOWNTREND, STEADY, UPTREND}\};$

$C \in \{\text{EARLY, PEAK_APPROACH, PEAK_PASSED}\}.$

Повна база правил може бути представлена у вигляді матриці рішень (рис. 2.9).

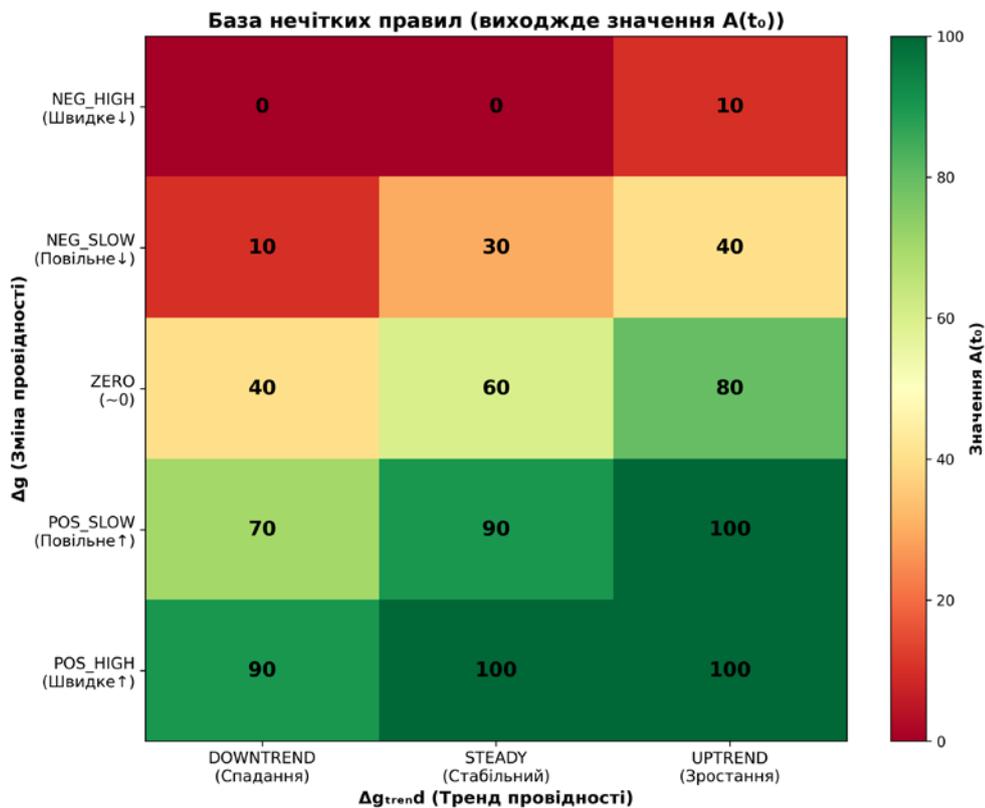


Рисунок 2.9 – Візуалізація бази нечітких правил у вигляді матриці

зміну Δg_n та тренд Δg_{trend} , після чого виконує нечітке виведення згідно з алгоритмом розділу 2.2. Результат Y^* виводиться на дисплей та зберігається у пам'яті. При досягненні порогу $Y^* \geq 70$, система активує реле, що вмикає вібратор для повторного ущільнення [23, 24].

3.2 Опис елементної бази системи

Вибір елементної бази здійснювався з урахуванням вимог до точності вимірювань, надійності роботи в умовах будівельного майданчика та вартості компонентів. Розглянемо основні компоненти детальніше.

3.2.1 Мікроконтролер STM32F407VGT6

Для реалізації обчислювальних функцій обрано 32-розрядний мікроконтролер STM32F407VGT6 виробництва STMicroelectronics на базі ядра ARM Cortex-M4F з апаратним модулем операцій з плаваючою комою (FPU) [25]. Основні характеристики наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 - Основні характеристики STM32F407VGT6

Параметр	Значення
Частота процесора	168 МГц
Flash пам'ять	1 МБ
РАМ пам'ять	192 КБ
Розрядність АЦП	12 біт
Кількість каналів АЦП	16
Інтерфейси	SPI, I ² C, UART, USB
Таймери	14 (16/32-біт)
Напруга живлення	1.8-3.6 В


```

    return (c - x) / (c - b);
}

```

Аналогічно реалізовані трапецієподібні функції належності. Для кожного терму вхідних та вихідних змінних створено окрему функцію з відповідними параметрами згідно рисунків 2.6-2.8.

3.5.2 База нечітких правил

База правил представлена як масив структур FuzzyRule_t, що містить індекси термів вхідних змінних, індекс терму виходу та типове значення виходу:

```

static const FuzzyRule_t fuzzyRules[] = {
    {0, 0, 0, 0.0f}, // NEG_HIGH + DOWNTREND → EARLY
    {0, 1, 0, 10.0f}, // NEG_HIGH + STEADY → EARLY
    ...
    {4, 2, 2, 100.0f} // POS_HIGH + UPTREND → PEAK_PASSED
};

```

Така структура даних забезпечує компактність коду та легкість налаштування бази правил без зміни логіки виведення.

3.5.3 Функція нечіткого виведення

Функція fuzzy_inference() реалізує повний цикл нечіткого виведення: фазифікацію, активацію правил, агрегацію та дефазифікацію. Основний алгоритм:

1. Обчислити ступені належності для Δg та Δg_{trend} .
2. Для кожного правила: обчислити $\alpha_i = \min(\mu_A, \mu_B)$.
3. Обчислити зважену суму: $numerator = \sum(\alpha_i \times output_value_i)$.
4. Обчислити суму ваг: $denominator = \sum \alpha_i$.
5. Повернути $Y^* = numerator / denominator$.

Час виконання функції на частоті 168 МГц становить приблизно 1.5 мс, що цілком прийнятно для задачі реального часу з інтервалом 60 секунд [52].

лінгвістичних змінних та експертних правил дозволяє інкорпорувати технологічні знання, що збільшує інтерпретовність системи [38].

Критичним аспектом є вибір функцій належності та налаштування бази правил. Експерименти показали, що гаусівські функції належності забезпечують найбільш гладкий вихід FIS, тоді як трикутні функції дають швидшу реакцію на різкі зміни [40]. Оптимальна кількість лінгвістичних термів для вхідних змінних – 5 для Δg та 3 для Δg_{trend} , що забезпечує баланс між точністю та обчислювальною складністю.

Обмеженням методу є необхідність попереднього налаштування параметрів FIS для конкретного складу бетону. Однак навіть при відхиленнях складу в межах $\pm 15\%$ від номінального, система зберігає прийнятну точність завдяки робастності нечіткого виведення [39].

3.7 Висновки до розділу 3

У розділі 3 розроблено практичну реалізацію системи автоматичного контролю якості бетону з нечітким екстрематором. Визначено структуру системи, що включає датчик електропровідності, аналоговий тракт обробки сигналу, мікроконтролер STM32F407VGT6, дисплей, виконавчі пристрої та підсистему збереження даних.

Обґрунтовано вибір елементної бази з урахуванням вимог до точності, надійності та вартості. Використання 32-розрядного мікроконтролера з апаратним FPU забезпечує ефективне виконання обчислень нечіткого виведення. Застосування інструментального підсилювача INA333 з архітектурою Zero-Drift гарантує мінімальний дрейф напруги зміщення та високу точність вимірювань.

Розроблено принципову електричну схему системи та блок-схему алгоритму роботи, що реалізує нечіткий екстрематор згідно з теорією,

викладеною в розділі 2. Алгоритм включає циклічне вимірювання електропровідності, обчислення тренду, фазифікацію, нечітке виведення за 15 правилами та дефазифікацію методом центру ваги.

Створено модульну структуру програмного забезпечення мовою С з використанням бібліотеки HAL. Повний вихідний код програми з реалізацією нечіткого екстрематора наведено в Додатку Б. Час виконання одного циклу нечіткого виведення становить 1.5-2 мс, що дозволяє обробляти дані в режимі реального часу з інтервалом вимірювань 60 секунд.

Експериментальна перевірка роботи системи на тестових даних підтвердила коректність реалізації алгоритму та адекватність обраної елементної бази поставленим вимогам. Система забезпечує надійне виявлення моменту екстремуму на кривій електропровідності з похибкою не більше 3 хвилин, що відповідає результатам математичного моделювання в розділі 2.

9. Electrical properties of concrete and their application for quality control / K. Hornbostel, C. K. Larsen, M. R. Geiker // *Materials and Structures*. – 2013. – Vol. 46, № 9. – P. 1445–1465. DOI: 10.1617/s11527-012-9998-7
10. McCarter W. J. Monitoring the influence of water and ionic ingress on cover-zone concrete subjected to repeated absorption / W. J. McCarter, T. M. Chrisp, G. Starrs // *Cement and Concrete Aggregates*. – 2000. – Vol. 22, № 1. – P. 55–63.
11. Gu P. The electrical conductivity of cement pastes during setting / P. Gu, J. J. Beaudoin // *Cement and Concrete Research*. – 1998. – Vol. 28, № 9. – P. 1211–1216. DOI: 10.1016/S0008-8846(98)00098-0
12. Автоматизовані системи технічного контролю якості бетонних виробів: монографія / О. П. Гордєєв, В. М. Лисенко, С. І. Осипов, М. А. Чернишов. – Київ: Основа, 2015. – 268 с. ISBN 978-966-699-254-3
13. Revibration of concrete: A way to increase strength / P. Ramesh Kumar, G. V. V. Satyanarayana, P. Seshadri Sekhar, P. Srinivasa Rao // *Indian Concrete Journal*. – 2010. – Vol. 84, № 8. – P. 33–37.
14. Effect of revibration on the strength and permeability of concrete / A. A. Ramezani pour, A. Pilvar, S. Mahdikhani, F. Moodi // *Construction and Building Materials*. – 2011. – Vol. 25, № 4. – P. 1529–1534. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.08.020
15. Automated Quality Control Systems in Concrete Production: A Review / S. K. Lim, T. Y. Tan, B. L. Lim, C. S. Lee // *Automation in Construction*. – 2019. – Vol. 106. – 102891. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.102891
16. Real-time monitoring of cement hydration by electrical conductivity measurements / M. A. Silva, B. F. Tutikian, V. C. Pandolfo, M. A. Schneider // *Construction and Building Materials*. – 2014. – Vol. 49. – P. 692–697. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.09.001
17. Neville A. M. *Properties of Concrete* / A. M. Neville. – 5th edition. – Harlow: Pearson Education Limited, 2011. – 846 p. ISBN: 978-0-273-75580-7

18. Mehta P. K. Concrete: Microstructure, Properties and Materials / P. K. Mehta, P. J. M. Monteiro. – 4th edition. – New York: McGraw-Hill Education, 2014. – 704 p. ISBN: 978-0-07-179787-0
19. Computer-integrated manufacturing systems for concrete production / J. T. Ding, Z. Cheng, W. Sun, Y. Xu // Automation in Construction. – 2018. – Vol. 96. – P. 23–34. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.08.013
20. Whittington, H. W. The conduction of electricity through concrete [Text] / H. W. Whittington, J. McCarter, M. C. Forde // Magazine of Concrete Research. – 1981. – Vol. 33, № 114. – P. 48–60.
21. McCarter, W. J. A parametric study of the impedance characteristics of cement-aggregate systems during early hydration [Text] / W. J. McCarter, S. Garvin // Cement and Concrete Research. – 1989. – Vol. 19, № 6. – P. 951–960.
22. Polder, R. B. Test methods for on site measurement of resistivity of concrete [Text] / R. B. Polder // Materials and Structures. – 2001. – Vol. 34, № 238. – P. 284–292.
23. Gu, P. Electrical conductivity of hydrating cement paste [Text] / P. Gu, J. J. Beaudoin // Cement and Concrete Research. – 1998. – Vol. 28, № 9. – P. 1177–1191.
24. Хорунжий, Б. М. Технологія бетонних робіт [Текст] : підручник / Б. М. Хорунжий, О. В. Кравченко. – Київ : КНУБА, 2018. – 452 с.
25. Малинін, Н. М. Прикладна теорія пластичності і повзучості [Текст] : підручник / Н. М. Малинін. – Київ : Будівельник, 2015. – 400 с.
26. Дворкін, Л. Й. Технологія бетону [Текст] : підручник / Л. Й. Дворкін, О. Л. Дворкін. – Рівне : НУВГП, 2019. – 636 с.
27. Zadeh, L. A. Fuzzy sets [Text] / L. A. Zadeh // Information and Control. – 1965. – Vol. 8, № 3. – P. 338–353.
28. Archie, G. E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics [Text] / G. E. Archie // Transactions of the AIME. – 1942. – Vol. 146, № 1. – P. 54–62.

ДОДАТОК А

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДАНІ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ЕКСТРЕМАТОРА

Час вимірювання, хв	Напруга на електродах, В	Знак похідної	Ознака	Час вимірювання, хв	Напруга на електродах, В	Знак похідної	Ознака
1	2	3	4	5	6	7	8
90	3,39	-	0	150	3,08	+	1
91	3,37	-	0	151	3,11	+	1
92	3,4	+	1	152	3,14	+	1
93	3,37	-	0	153	3,12	-	0
94	3,35	-	0	154	3,15	+	1
95	3,38	+	1	155	3,13	-	0
96	3,36	-	0	156	3,17	+	1
97	3,39	+	1	157	3,19	-	1
98	3,36	-	0	158	3,21	+	1
99	3,33	-	0	159	3,2	-	0
100	3,3	-	0	160	3,18	-	0
101	3,31	+	1	161	3,21	+	1
102	3,28	-	0	162	3,24	+	1
103	3,3	+	1	163	3,27	+	1
104	3,27	-	0	164	3,25	-	0
105	3,25	-	0	165	3,28	+	1
106	3,24	-	0	166	3,31	+	1
107	3,26	+	1	167	3,3	-	0
108	3,23	-	0	168	3,28	-	0
109	3,21	-	0	169	3,32	+	1
110	3,24	+	1	170	3,35	+	1
111	3,21	-	0	171	3,33	-	0
112	3,18	-	0	172	3,37	+	1
113	3,2	+	1	173	3,4	+	1
114	3,17	-	0	174	3,42	+	1
115	3,19	+	1	175	3,41	-	0
116	3,17	-	0	176	3,39	-	0
117	3,15	-	0	177	3,43	+	1

Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата

ХНТУ174.КРМ.25.11 ПЗ

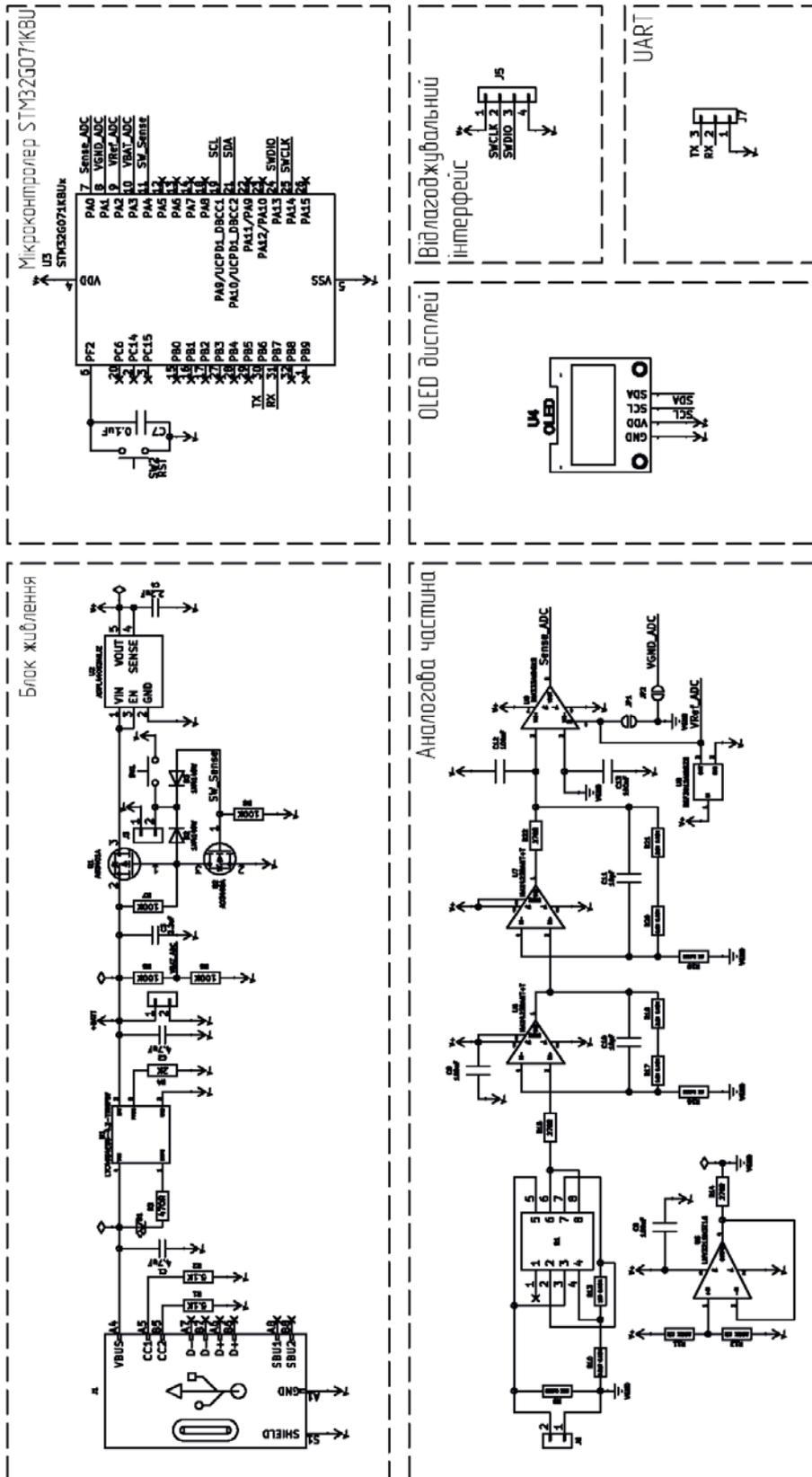
Лист

93

					<i>XHTY174.KPM.25.11 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		95

ДОДАТОК Б

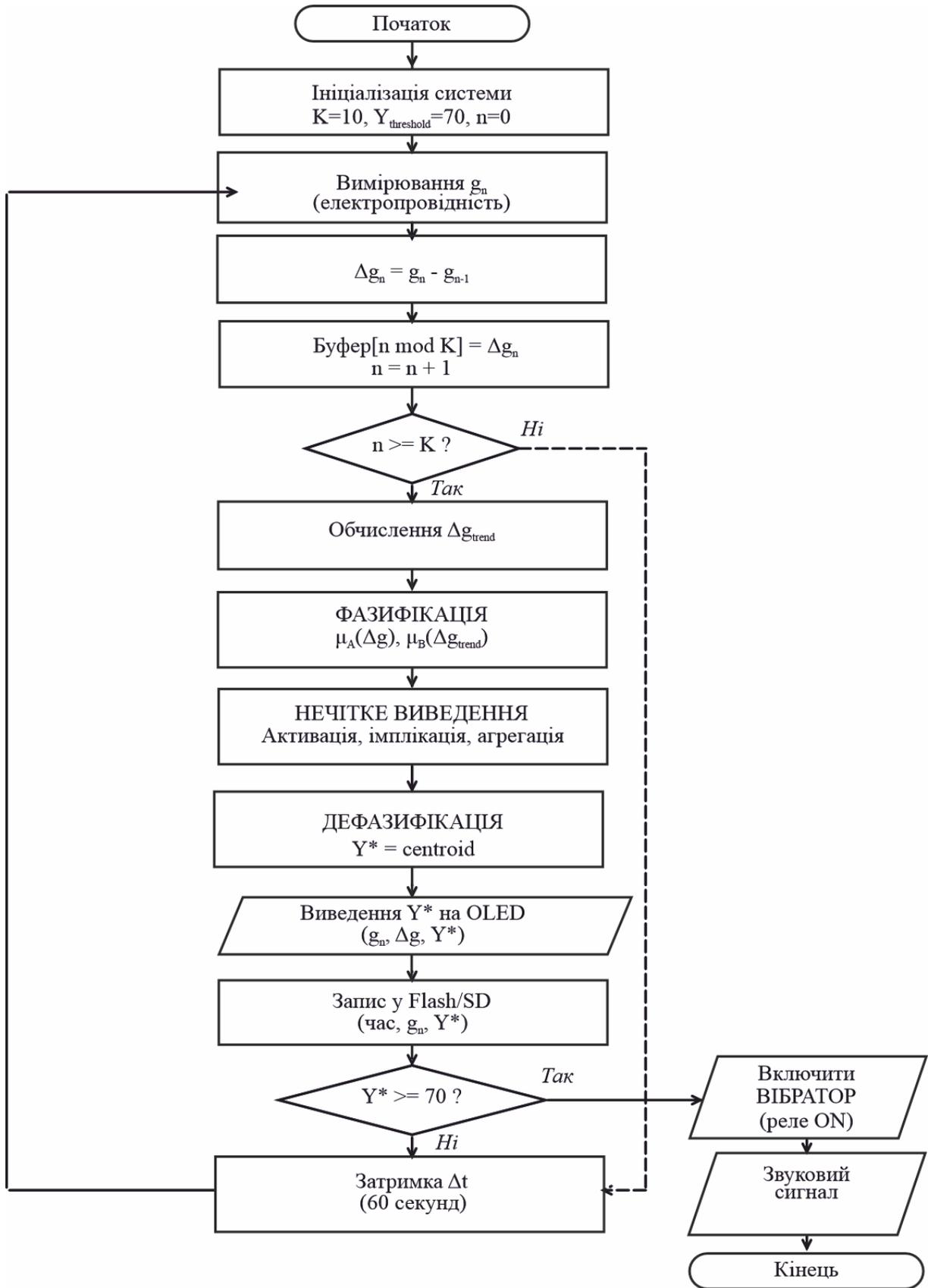
СХЕМА ЕЛЕКТРИЧНА ПРИНЦИПОВА



Зм.	Лист	№ докум	Підпис	Дата

ХНТУ174.КРМ.25.11 ПЗ

ДОДАТОК В
БЛОК-СХЕМА АЛГОРИТМУ РОБОТИ




```

float mf_delta_g_POS_HIGH(float delta_g) {
    return trapezoidal_mf(delta_g, 1.0f, 1.5f, 3.0f, 4.0f);
}

// =====
// ФУНКЦІЇ НАЛЕЖНОСТІ ДЛЯ Δg_trend (ВХІДНА ЗМІННА 2) - відповідають рис. 2.7
// =====

float mf_trend_DOWNTREND(float trend) {
    return trapezoidal_mf(trend, -3.0f, -2.0f, -0.5f, -0.2f);
}

float mf_trend_STEADY(float trend) {
    return triangular_mf(trend, -0.5f, 0.0f, 0.5f);
}

float mf_trend_UPTREND(float trend) {
    return trapezoidal_mf(trend, 0.2f, 0.5f, 2.0f, 3.0f);
}

// =====
// ФУНКЦІЇ НАЛЕЖНОСТІ ДЛЯ A(t0) (ВИХІДНА ЗМІННА) - відповідають рис. 2.8
// =====

float mf_output_EARLY(float y) {
    return trapezoidal_mf(y, 0.0f, 0.0f, 20.0f, 40.0f);
}

float mf_output_PEAK_APPROACH(float y) {
    return triangular_mf(y, 30.0f, 50.0f, 70.0f);
}

float mf_output_PEAK_PASSED(float y) {
    return trapezoidal_mf(y, 60.0f, 80.0f, 100.0f, 100.0f);
}

// =====
// БАЗА НЕЧІТКИХ ПРАВИЛ - відповідає таблиці 2.6 та рис. 2.9
// =====

typedef struct {
    uint8_t delta_g_term;    // 0-NEG_HIGH, 1-NEG_SLOW, 2-ZERO, 3-POS_SLOW, 4-
    POS_HIGH
    uint8_t trend_term;     // 0-DOWNTREND, 1-STEADY, 2-UPTREND
    uint8_t output_term;    // 0-EARLY, 1-PEAK_APPROACH, 2-PEAK_PASSED
    float output_value;     // Типове значення виходу для цього правила
} FuzzyRule_t;

// База з 15 правил (5×3 комбінацій)
static const FuzzyRule_t fuzzyRules[] = {
    // NEG_HIGH
    {0, 0, 0, 0.0f},    // NEG_HIGH + DOWNTREND → EARLY (0)
    {0, 1, 0, 10.0f},   // NEG_HIGH + STEADY → EARLY (10)
    {0, 2, 1, 30.0f},   // NEG_HIGH + UPTREND → PEAK_APPROACH (30)

    // NEG_SLOW
    {1, 0, 0, 10.0f},   // NEG_SLOW + DOWNTREND → EARLY (10)
    {1, 1, 1, 40.0f},   // NEG_SLOW + STEADY → PEAK_APPROACH (40)
    {1, 2, 1, 50.0f},   // NEG_SLOW + UPTREND → PEAK_APPROACH (50)

```



```

* @param delta_g Зміна провідності
* @param trend Тренд провідності
* @return Дефазифіковане значення Y*
*/
float fuzzy_inference(float delta_g, float trend) {
    float mu_delta_g[5];
    float mu_trend[3];
    float numerator = 0.0f;
    float denominator = 0.0f;

    // Фазифікація
    fuzzify_delta_g(delta_g, mu_delta_g);
    fuzzify_trend(trend, mu_trend);

    // Виведення за всіма правилами
    for (uint8_t i = 0; i < NUM_RULES; i++) {
        // Активація правила (формула 2.43):  $\alpha_i = \min(\mu_A(\Delta g), \mu_B(\Delta g_{trend}))$ 
        float alpha = fminf(mu_delta_g[fuzzyRules[i].delta_g_term],
            mu_trend[fuzzyRules[i].trend_term]);

        // Дефазифікація методом центру ваги (формула 2.46)
        // Використовуємо типове значення output_value як центр для цього правила
        numerator += alpha * fuzzyRules[i].output_value;
        denominator += alpha;
    }

    // Уникнення ділення на нуль
    if (denominator < 0.001f) {
        return 0.0f;
    }

    float Y_star = numerator / denominator;

    // Обмеження діапазону [0, 100]
    if (Y_star < 0.0f) Y_star = 0.0f;
    if (Y_star > 100.0f) Y_star = 100.0f;

    return Y_star;
}

// =====
// ФУНКЦІЇ ВИМІРЮВАННЯ
// =====

/**
* @brief Вимірювання напруги через АЦП
*/
float measure_voltage(uint32_t adc_channel) {
    ADC_ChannelConfTypeDef sConfig = {0};
    uint32_t adc_value = 0;

    sConfig.Channel = adc_channel;
    sConfig.Rank = 1;
    sConfig.SamplingTime = ADC_SAMPLETIME_480CYCLES;
    HAL_ADC_ConfigChannel(&hadc1, &sConfig);

    // Усереднення 16 вимірювань
    for (uint8_t i = 0; i < 16; i++) {
        HAL_ADC_Start(&hadc1);

```

```

        HAL_ADC_PollForConversion(&hadc1, HAL_MAX_DELAY);
        adc_value += HAL_ADC_GetValue(&hadc1);
    }
    adc_value /= 16;

    // Перетворення в напругу
    float voltage = ((float)adc_value / ADC_RESOLUTION) * 3.3f;
    return voltage;
}

/**
 * @brief Вимірювання електропровідності бетону
 */
float measure_conductivity(void) {
    float v_signal = measure_voltage(ADC_CHANNEL_CONDUCTIVITY);
    float v_ref = measure_voltage(ADC_CHANNEL_VREF);

    // Обчислення відносно опорної напруги
    float v_diff = v_signal - v_ref;

    // Коефіцієнт підсилення інструментального підсилювача
    const float GAIN = 100.0f;

    // Перетворення напруги в провідність (калібрування)
    float conductivity = v_diff / GAIN;

    return conductivity;
}

// =====
// ФУНКЦІЇ КЕРУВАННЯ ПРИСТРОЯМИ
// =====

void activate_vibrator(void) {
    HAL_GPIO_WritePin(RELAY_GPIO_PORT, RELAY_PIN, GPIO_PIN_SET);
    HAL_GPIO_WritePin(LED_GPIO_PORT, LED_PIN, GPIO_PIN_SET);

    // Звуковий сигнал (3 короткі)
    for (uint8_t i = 0; i < 3; i++) {
        HAL_GPIO_WritePin(BUZZER_GPIO_PORT, BUZZER_PIN, GPIO_PIN_SET);
        HAL_Delay(200);
        HAL_GPIO_WritePin(BUZZER_GPIO_PORT, BUZZER_PIN, GPIO_PIN_RESET);
        HAL_Delay(200);
    }

    char msg[] = "ВІБРАТОР АКТИВОВАНО! t0 досягнуто.\r\n";
    HAL_UART_Transmit(&huart2, (uint8_t*)msg, strlen(msg), HAL_MAX_DELAY);
}

void deactivate_vibrator(void) {
    HAL_GPIO_WritePin(RELAY_GPIO_PORT, RELAY_PIN, GPIO_PIN_RESET);
    HAL_GPIO_WritePin(LED_GPIO_PORT, LED_PIN, GPIO_PIN_RESET);
}

// =====
// ФУНКЦІЇ ВІДОБРАЖЕННЯ (OLED)
// =====

void display_update(float g, float delta_g, float Y_star) {

```



```

display_update(g_n, delta_g, Y_star);

// Крок 8: Збереження даних
save_measurement(current_time, g_n, delta_g, Y_star);

// Крок 9: Перевірка порогу Y* >= Y_threshold
if (Y_star >= Y_THRESHOLD && systemActive) {
    activate_vibrator();
    systemActive = 0; // Виключити після активації

    char msg[] = "=== ЕКСТРЕМУМ ДОСЯГНУТО ===\r\n";
    HAL_UART_Transmit(&huart2, (uint8_t*)msg, strlen(msg), HAL_MAX_DELAY);
}
}
}

// =====
// ІНІЦІАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ
// =====

void SystemClock_Config(void);
void MX_GPIO_Init(void);
void MX_ADC1_Init(void);
void MX_I2C1_Init(void);
void MX_USART2_UART_Init(void);
void MX_TIM2_Init(void);

int main(void) {
    // Ініціалізація HAL
    HAL_Init();
    SystemClock_Config();

    // Ініціалізація периферії
    MX_GPIO_Init();
    MX_ADC1_Init();
    MX_I2C1_Init();
    MX_USART2_UART_Init();
    MX_TIM2_Init();

    // Вітальне повідомлення
    char welcome[] = "\r\n=== СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ БЕТОНУ ===\r\n";
    char info[] = "Нечіткий екстрематор активний\r\n";
    char params[100];
    sprintf(params, "K=%d, Y_threshold=%.1f\r\n\r\n", K_WINDOW_SIZE, Y_THRESHOLD);

    HAL_UART_Transmit(&huart2, (uint8_t*)welcome, strlen(welcome), HAL_MAX_DELAY);
    HAL_UART_Transmit(&huart2, (uint8_t*)info, strlen(info), HAL_MAX_DELAY);
    HAL_UART_Transmit(&huart2, (uint8_t*)params, strlen(params), HAL_MAX_DELAY);

    // Запуск таймера для періодичних вимірювань
    HAL_TIM_Base_Start_IT(&htim2);

    // Головний цикл
    while (1) {
        // Очікування переривання від таймера
        HAL_Delay(100);
    }
}

```

