

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Механічний факультет

Кафедра метрології та безпеки життєдіяльності

ДИПЛОМНА РОБОТА

бакалавра

РОЗРОБКА ВИМІРЮВАЛЬНОГО КАНАЛУ ВОЛОГОСТІ
ДЛЯ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ

Завідувач кафедри, д-р. т.н., проф.



О. І. Богатов

Нормоконтролер, к.т.н., доцент



М. В. Москаленко

Керівник, к.т.н., доцент



Д. Є. Петрукович

Студент гр. ММ-41



Б. М. Шаншин

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Факультет механічний
Кафедра метрології та безпеки життєдіяльності
Освітній рівень бакалавр
Галузь знань 15 «Автоматизація та приладобудування»
Спеціальність 152 «Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри



О. І. Богатов

«02» 04 2023 р.

ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Шаншину Богдану Миколайовичу

1. Тема роботи: «Розробка вимірвального каналу вологості для контролю якості сипких матеріалів».

Керівник роботи Петрукович Дмитро Євгенович, канд. техн. наук, доцент
Затверджені рішенням Вченої ради механічного факультету від "31" березня 2023 року № 31.

2. Строк подання студентом роботи 01.06.2023 р.

3. Вхідні дані до роботи: 1) міжнародні, європейські, міждержавні, національні та галузеві стандарти з вимірювань вологості (підклас 17.060) щєбню (ДСТУ Б В.2.7-71-98, ГОСТ 8269.0- 97), піску (ДСТУ Б В.2.7-32-95, ДСТУ Б В.2.7-34-2001, ДСТУ Б В.2.7-35-2001, ДСТУ Б В.2.7-131:2007, ГОСТ 8736-93) та сумішів з них (ГОСТ 23735-79) для будівництва автомобільних доріг (підклас 91.100.15)

4. Перелік питань, які потрібно розробити: 1) Аналіз вимог щодо вимірювань параметрів вологості при контролі якості дрібнозему, поруватого і непоруватого гравію та каменів, щєбня та піску. 2) Обґрунтування елементів та складу вимірвального каналу, розробка його структурної, функціональної, принципової схеми та вибір ємнісних перетворювачів для вимірювань параметрів вологості при контролі якості щєбня та піску. 3) Розрахунок складових похибки вимірвальних каналів вологості. 4) Охорона праці при вимірюваннях параметрів вологості для контролю якості щєбня та піску. 5) Оцінка економічної ефективності запропонованих рішень щодо вимірвальних каналів вологості

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): непередбачено.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
4	Канд. техн. наук, доц. Богатов О. І.	02.04.2023	02.04.2023

7. Дата видачі завдання 02 квітня 2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз літератури.	05 квітня – 10 квітня 2023 р.	виконано
2.	Аналіз вимог щодо вимірювань параметрів вологості при контролі якості сипких матеріалів, розробка структурної, функціональної та принципової схем вимірювального каналу вологості.	11 квітня – 25 квітня 2023 р.	виконано
3.	Розрахунок складових похибки вимірювальних каналів вологості.	26 квітня – 05 травня 2023 р	виконано
4.	Аналіз параметрів вимірювальних каналів і ємнісних вимірювачів вологості щєбня та піску	06 травня – 20 травня 2023 р	виконано
5.	Формулювання висновків.	21 – 28 травня 2023 р	виконано
6.	Оформлення пояснювальної записки.	29 травня 2023 р	виконано
8.	Подання роботи керівнику.	30 – 31 травня 2023 р	виконано
	Подання роботи на рецензію.	01 червня 2023 р	виконано

Студент

Шаншин Б. М.

Керівник роботи

Петрукович Д. Є.

РЕФЕРАТ

Дипломна робота: 64 сторони, 11 рисунків, 9 таблиць, 1 додаток, 24 джерела.

ВИМІРЮВАННЯ, ВОЛОГІСТЬ, ВОЛОГОВІСТ, ВИМІРЮВАЛЬНИЙ КАНАЛ, ГРУНТ, ДАТЧИК, ПОХИБКА, ПЕРЕТВОРЮВАЧ, ПІСОК, ЩЕБЕНЬ.

Мета роботи – розробка вимірювального каналу вологості для контролю якості щебня та піску.

Об'єкт дослідження – вимірювальний канал вологості щебня та піску.

Метод дослідження – визначення похибки вимірювальних каналів вологості щебня та піску.

Об'єктом розробки є вимірювальний канал для вимірювання в лабораторних та реальних умовах на підприємстві вологості сипких матеріалів (пісок, щебня), та інших подібних по діелектричних властивостях матеріалів. На підставі аналізу методів виміру вологості, розробка відповідає таким критеріям:

- часу вимірювання;
- абсолютній похибці;
- простота конструкції.

Досліджено базову модель контурного датчика. Датчик вологості сипких матеріалів у поточних режимах призначений як для автономного, так і для комплексного використання при спорудженні та будівництві доріг.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць скорочень і термінів.....	6
Вступ.....	7
1 Аналіз вимог щодо вимірювань параметрів вологості при контролі якості сипких матеріалів.....	9
1.1 Основні методи вимірювання вологості.....	9
1.2 Аналіз вимог щодо вимірювань параметрів вологості при контролі якості сипких матеріалів.....	12
1.3 Порівняльний аналіз методів вимірювання вологості.....	14
2 Обґрунтування елементів та складу вимірювального каналу, розробка його структурної схеми та вибір ємнісних перетворювачів.	18
2.1 Розробка структурної схеми вимірювального каналу вологості піску (щебня).....	18
2.2 Розробка функціональної схеми.....	21
2.3 Розробка принципової електричної схеми.....	22
2.4 Схема підключення індикатора.....	25
2.5 Обґрунтування елементної бази.....	26
2.6 Вибір ємнісних перетворювачів.....	32
2.7 Визначення характеристик вологочутливого ємнісного сенсору	34
3 Розрахунок складових похибки вимірювальних каналів вологості...	42
3.1 Визначення ємності первинного перетворювача вологості.....	43
3.2 Оцінювання впливу зміни діелектричної проникності матеріалу.....	46
3.3 Використання диференційних вимірювальних схем для зменшення додаткових похибок.....	52
4 Охорона праці й навколишнього середовища.....	57
Висновки.....	60
Перелік посилань.....	61
Додаток А Ілюстративний матеріал до дипломної роботи.....	64

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І
ТЕРМЕНІВ

ГІС - гібридна інтегральна схема

ДП - діелектрична проникність

КПО - коефіцієнт природного освітлення

НДІ - науково-дослідницький інститут

НДР - науково-дослідницька робота

ОП - охорона праці

ПДВ - податок на додану вартість

ТКЛР - температурний коефіцієнт лінійного розширення

ТКО - температурний коефіцієнт опору

ТКЄ - температурний коефіцієнт ємності

ЯМР - ядерний магнітний резонанс

ВСТУП

Одним з основних технологічних параметрів, що визначають якість автодоріг, сипких матеріалів що добувають, переробляють є вологість.

Вологість – вода, що міститься в речовині, в природному стані і не відділяється від його частинок якщо не прикладене зовнішнє зусилля.

Більшість технологічних процесів має у складі операції, пов'язані зі зміною змісту вологи в переробляємих матеріалах (операції зволоження й зневоднювання) і автоматизація таких процесів неможлива без наявності вимірювальних інформаційних систем, що дозволяють одержувати експресну й достовірну інформацію про вологість продуктів, які переробляють.

Пісок (щебень) - незамінний матеріал у будівництві. Він має домішки, і характеристики, однієї з яких є вологість піску. Вологість досить сильно впливає на насипну щільність піску. На відміну від інших будівельних матеріалів, для яких збільшення вологості приводить до збільшення щільності, у піску картина повністю протилежна. Зволожений пісок втрачає свої якості, а саме - сипкість. Піщинки вологого піску сліпаються в агрегати, що приводить до того, що утвориться пухка структура.

У будівництві автодоріг вологість матеріалів впливає на їх теплофізичні властивості й довговічність будівельних конструкцій, виготовлених з них. Волога в піску є одним з обов'язкових компонентів більшості твердих неметалічних матеріалів.

Підвищення вологості матеріалів приводить до непродуктивних витрат при їхньому транспортуванні. У ряді випадків при прийманні матеріалів установлюються обмеження верхньої межі вологості; при перевищенні допустимої вологості приймання цих матеріалів не допускається.

Нині в Україні визначення вологості є одним із поширених напрямів вимірювань. Це зумовлено розвитком металургії, енергетики, машинобудування, ефективність яких залежить від точності вимірювання вологості. Виходячи з цього розроблення вимірювального каналу вологості

являється актуальним технічним завданням. Таким чином використання датчиків вологості ємнісного типу пояснюється простотою у використанні та низькою вартістю.

Контроль вологості піску необхідний у процесах його видобування, зберігання, транспортування та переробки. На даний час існує велика кількість датчиків для вимірювання вологості сипких матеріалів. Деякі мають високу вартість та одночасно низьку надійність, другі – застарілу технологію вимірювання. В роботі наводиться один з можливих способів розв'язання цієї проблеми, що і становить її мету.

Основною метою роботи є створення вимірювального каналу вологості для контролю якості щебня та піску.

1 АНАЛІЗ ВИМОГ ЩОДО ВИМІРЮВАНЬ ПАРАМЕТРІВ ВОЛОГОСТІ ПРИ КОНТРОЛІ ЯКОСТІ ЩЕБЕНЯ ТА ПІСКУ

1.1 Основні методи вимірювання вологості

Через відсутність установлених стандартами одиниць вимірювання вологовмісту розглядаються величини, прийняті для цієї мети в науково-технічній літературі й на практиці [1].

Найпоширенішими є дві величини: вологовміст і вологість. Обидві є відносними й виражаються в безрозмірних одиницях або у відсотках. Раніше застосовувалися найменування: абсолютна вологість (замість вологовмісту) і відносна вологість (замість вологості) [1,2].

Під вологовмістом (масовим) u розуміється відношення маси води M , що втримується в тілі, до маси абсолютно сухого тіла M_0 [3]:

$$u = \frac{M}{M_0} \quad \text{або} \quad u = \frac{M}{M_0} * 100\% . \quad (1.1)$$

Під вологістю (масової) W розуміється відношення маси води M , що втримується в тілі, до маси вологого матеріалу M_1 [3]:

$$W = \frac{M}{M_1} = \frac{M}{M_0 + M} \quad \text{або} \quad W = \frac{M}{M_0 + M} * 100\% . \quad (1.2)$$

Для визначення змісту води в матеріалі може бути застосована кожна із цих величин. Перехід від однієї до іншої величини може бути описаний виразом [3, 4]:

$$W = \frac{u}{1+u}; \quad (1.3)$$

$$u = \frac{W}{1-W}. \quad (1.4)$$

Так, наприклад, $u = 1$ відповідає $W = 0,5$.

У певних галузях для визначення змісту вологи в матеріалі застосовується вологовміст u або вологість W . Здебільшого змість вологи задається вологовмістом u ; у виробничих умовах для цієї мети частіше застосовують вологість W .

При вимірюванні вологості ґрунтів, користуються величинами, які характеризують зміст води в одиниці об'єму даного матеріалу. За даним принципом розрізняють [3, 5]:

а) об'ємну вологість:

$$W_{об} = \frac{M}{V} = \frac{V_B}{V} p_B = W_\rho; \quad (1.5)$$

б) об'ємний вологовміст:

$$u_{об} = \frac{M}{V_0} = \frac{V_B}{V_0} p_B = u \cdot p_0, \quad (1.6)$$

де V, V_0, V_B, p, p_0, p_B – обсяг і щільність вологого, абсолютно сухого матеріалу й води. Об'ємна вологість і вологовміст мають розмірність щільності.

Для переходу від об'ємних до масових величин необхідно знати щільність матеріалу [1,2]. Визначення щільності пов'язане із труднощами, у зв'язку із чим об'ємні одиниці не одержали широкого використання. Якщо прийняти, що

обсяги абсолютно сухого й вологого матеріалу рівні тобто $V=V_0$, можна легко встановити зв'язок між p , p_0 і величиною, яка характеризує вологість [6, 7]:

$$W = \frac{V_\rho - V_{\rho 0}}{V_\rho}, \quad (1.7)$$

де:

$$p = \frac{p_0}{1 - W} = p_0(u + 1). \quad (1.8)$$

В окремих галузях деякі величини, похідні від розглянутих, знайшли досить вузьке застосування. Для характеристики змісту води в листових матеріалах застосовують відношення маси води M к площі S поверхні матеріалу [3]:

$$W_{II} = \frac{M}{S}. \quad (1.9)$$

У ряді випадків прибігають до величини “зміст сухої речовини” [3]:

$$A = \frac{1}{1 + u} = 1 - W. \quad (1.10)$$

Розглянемо деякі характеристика методів, які знайшли практичне застосування.

1.2 Аналіз вимог щодо вимірювань параметрів вологості при контролі якості сипких матеріалів

Вологість сипких матеріалів (піску та щебню) визначають шляхом порівняння маси проби у вологому стані і маси проби після висушування. Існують такі засоби контролю:

- ваги настільні циферблатні або лабораторні;
- шафа сушильна.

Порядок підготовки та проведення випробування роблять таким чином.

Із сипкого матеріалу випробуваної фракції беруть аналітичну пробу масою, потім пробу насипають в посудину і зважують, висушують до постійної маси і знову зважують.

Вологість визначають на зразках правильної або довільної форми.

Вологість піску (щебню) $W, \%$ за масою, визначають за формулою [3]:

$$W = \frac{m_g - m}{m} 100, \quad (1.11)$$

де m_g - маса проби у вологому стані, (г);

m - маса проби у сухому стані, (г).

Визначають масу з похибкою до 0,1 %, якщо в стандарті на дані сипкі матеріали не даються інші вказівки.

Проби та зразки в стані природної вологості проходять висушування до постійної маси при температурі $(105 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$ поки різниця між результатами двох послідовних зважувань буде не більше 0,1 % взятої маси. Наступне зважування проводять після висушування протягом 60 хв і охолодження 45 хв.

Зразки для випробувань беруться циліндричної або кубічної форми. Розміри зразків вимірюють з похибкою 0,1 мм.

Площа зразка циліндричної форми обчислюють за середньоарифметичному значенням двох взаємно перпендикулярних діаметрів.

При визначенні площі зразка кубічної форми визначають середньоарифметичне значення довжини кожної пари паралельних ребер даної грані.

Об'єм зразка розраховується як добуток площі поперечного перерізу та висоти.

Результати випробувань розраховують з точністю до другого знаку, якщо не дані інші вказівки щодо точності обчислення.

В якості норм точності результатів випробувань використовують похибку R_{max} , що характеризує можливі розбіжності між результатами випробувань одного матеріалу одним методом в одній лабораторії.

Для обчислення похибки повторюваності використовують не менше 20 результатів випробувань в даній лабораторії.

Середньоквадратичну похибку повторюваності S_n визначають за формулою [2,7]:

$$S_n = Q \cdot 886, \quad (1.12)$$

де Q - середній розмах по всім парам паралельних результатів випробувань.

Для визначення зернового складу окремих фракцій піску (щебню) повинні застосовуватися сита з круглими або квадратними отворами на круглих або квадратних обичайках з діаметром або стороною не менше 300 мм.

При визначенні показників якості суміші фракцій випробовують окремо кожну і обчислюють середньозважене значення x визначає показник y відповідності до змісту фракції в суміші.

Випробування на стиск зразків гірської породи або щебню (гравію) на дробильність в циліндрі повинні проводитися на гідравлічних пресах.

Гранична навантаження преса P_{max} повинна бути такою, щоб очікуване значення максимального зусилля в процесі випробування вкладалося на шкалі преса від $0,3 P_{max}$ до $0,8 P_{max}$.

Температура приміщення, в якому проводять випробування, повинна бути (20 ± 5) °С. Перед початком випробування пісок (щебінь) і вода повинні мати температуру, що відповідає температурі повітря в приміщенні [8].

Граничні відхилення від номінальних розмірів проби не повинні бути більшими за довжиною, шириною та товщиною ніж ± 2 мм [8].

Проби повинні мати форму паралелепіпеду. Допускається виготовлення проб з закругленими вертикальними ребрами, при цьому радіус не повинен перевищувати 6 мм. Непаралельність граней не повинна бути більше 1 мм. Поверхня граней проб повинна бути плоскою, ребра – прямолінійними [4].

1.3 Порівняльний аналіз методів вимірювання вологості

Методи вимірювання вологості діляться на прямі й непрямі [3, 9]. У прямих методах виробляється безпосередній розділ матеріалу на суху й вологу речовину. У непрямих методах вимірюється величина, функціонально зв'язана з вологістю сипкого матеріалу. При використанні непрямих методів необхідно виконання попереднього калібрування з метою встановлення залежності між вологістю й вимірюваною фізичною величиною.

Найпоширенішим прямим методом є термогравиметрический метод висушування. Даний метод ґрунтується на повітряно-тепловому сушінні зразка матеріалу при цьому повинно бути досягнення рівноваги з навколишнім середовищем. На практиці використовується висушування до постійної ваги, найчастіше використовують прискорений метод сушіння. В першому випадку сушіння закінчують, якщо два послідовних зважування зразку дають однакові або досить близькі результати вимірювання. Швидкість сушіння поступово зменшується, при цьому віддаляється практично вся волога, яка знаходиться в зразку. Тривалість визначення цим методом становить звичайно від декількох

годин до доби й більше. У прискорених методах сушіння ведеться протягом певного проміжку часу при підвищеній температурі. Для прискореного сушіння матеріалів застосовують інфрачервоні промені, в окремих випадках - діелектричне нагрівання.

Визначенню вологості сипких матеріалів, включно піску та щебню, висушуванням властиві наступні методичні похибки [7, 10]:

- при висушуванні матеріалів поряд із втратою гігроскопічної вологи втрачаються летучі складові;
- припинення висушування відповідає рівновазі між тиском водяних парів в сипких матеріалах та тиском водяних парів у повітрі;
- у речовинах у ході сушіння утвориться водонепроникна кірка, яка заважає подальшому видаленню вологи.

Деякі з даних похибок можна зменшити проводячи сушіння у вакуумі при зниженій температурі або використовуючи потік інертного газу. Однак для вакуумному сушінню потрібно більше громіздка й складна апаратури, чим для повітряно-теплової.

У непрямих методах оцінка вологості матеріалу виконується по зміні різних його властивостей. З непрямих методів найбільш поширені є фізичні методи.

Фізичні методи гуртуються на перетворенні вологості в іншу фізичну величину, більш зручну для вимірювань й подальших перетворень. Характер вимірюваної властивості може використовуватись, як основна ознака для класифікації фізичних методів вимірювань вологості.

Фізичні методи (рисунок 1.1) дозволяють автоматизувати вимірювання вологості й знаходять застосування в вимірювальних інформаційних системах.

Більшість вологомірів дозволяє проводити вимірювання без порушення зразка, чим досягається можливість повторення вимірювань на тому самому зразку при перевірці результату вимірювання. Це приводить до додаткового скорочення тривалості вимірювань.

Порівняємо методи вимірювання вологості. Для цього необхідно визначитися з критеріями, по яких порівнюються існуючі методи. Виходячи з технічного завдання такими критеріями являються [3, 4]:

- час вимірювання;
- абсолютна похибка;
- простота конструкції.

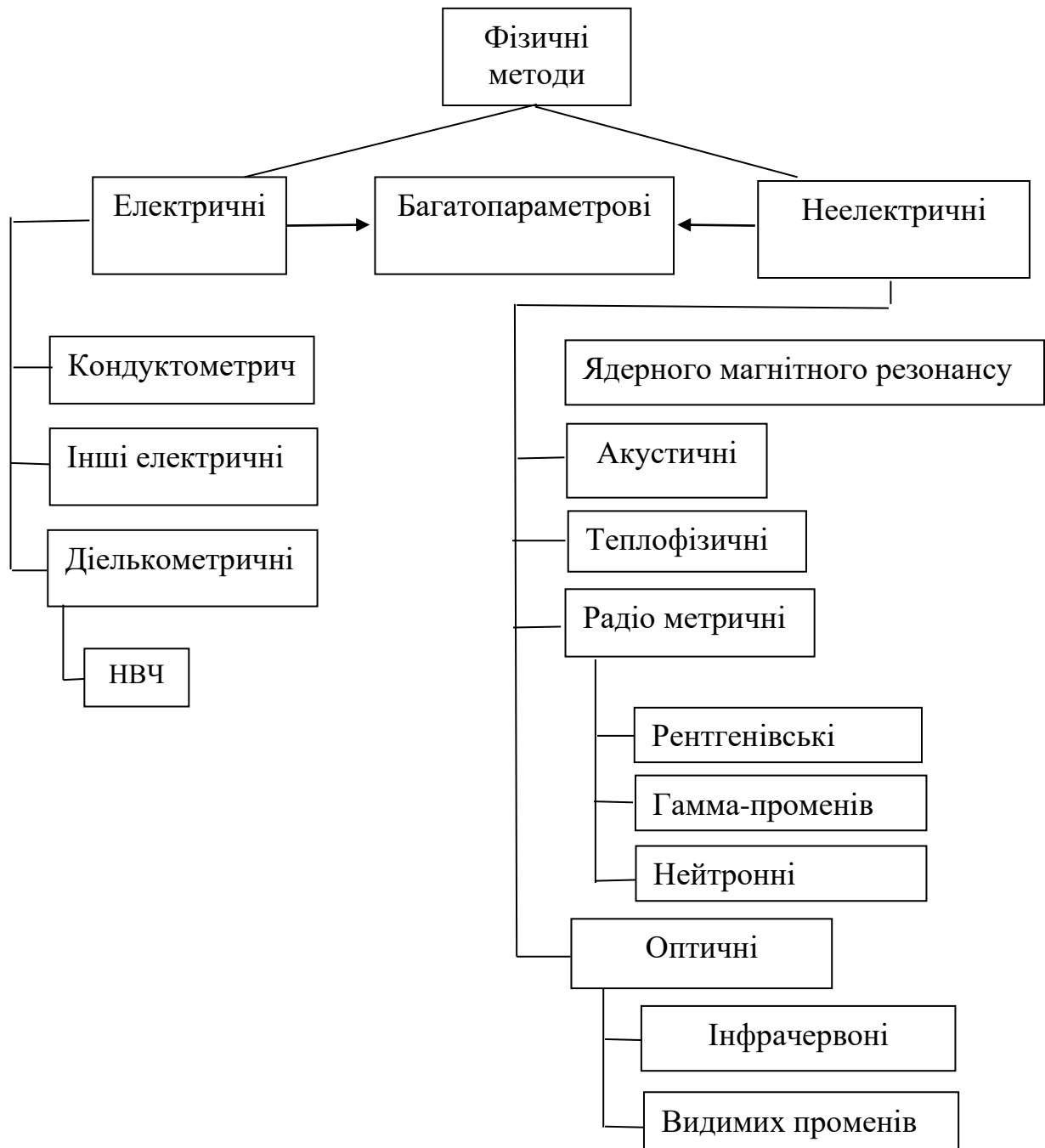


Рисунок 1.1 - Методи вимірювань вологості

За кожним критерієм обрані методи оцінюються по 5-ти бальній системі. Вищий бал відповідає найкращому методу. Результати аналізу зведені в таблицю 1.1.

Таблиця 1.1 - Порівняльний аналіз методів вимірювання вологості

Критерії Методи	Час вимірювання	Абсолютна похибка	Простота конструкції	Σ
прямі	1	5	2	8
теплофізичні	3	2	3	8
кондуктометричні та інші неелектричні	4	3	3	10
ЯМР	5	4	2	11
електричні	5	3	2	10
діелькометричні	5	5	4	14
інші електричні	5	3	2	10

Підсумкова колонка таблиці 1.1 показує, що самим найкращим в даній ситуації є діелькометричний метод. Тим самим реалізуються переваги діелькометричного методу вимірювань піску та щебня.

2 ОБГРУНТУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ТА СКЛАДУ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КАНАЛУ, РОЗРОБКА ЙОГО СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ТА ВИБІР ЄМНІСНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

2.1 Розробка структурної схеми вимірювального каналу вологості сипких матеріалів

Діелектричний метод вимірювання є широко поширеним у вологометрії сипких матеріалів: піску, щебня. Окрім вологості, на ефективну діелектричну проникність (ДП) сипкої речовини також впливають різні фактори, які впливають на додаткові похибки вимірювання. Основними джерелами додаткових похибок являється зміна досліджуваної речовини, змінний гранулометричний склад та форма часток речовини, густина та неідентичність процесу ущільнення, сегрегація під час ущільнення, відмінність умов заповнення первинного вимірювального перетворювача.

Фактори, які негативно впливають на точність результату вимірювання, а також неможливість компенсації їх впливу на результат вимірювання являються причинами того, що засоби вимірювання, при використанні мікроконтролерів з зберіганням статистичних даних та градуовальних характеристик, не здатні подолати позначку у 0,5 % абсолютної похибки вимірювання вологості [3, 4, 7].

Відомо конструкції первинних перетворювачів [10, 11], у яких шляхом зміни положення одного з електродів вимірювального конденсатора реалізується диференційний метод вимірювання. Це дозволило істотно зменшити кількість додаткових похибок вимірювання: від паразитних ємностей первинного перетворювача, струмів витоку через електровідводи, впливу крайових ефектів. У первинних перетворювачах зі змінним положенням обкладинок конденсаторів визначають зміну ємності незаповненого перетворювача за умов зміни положення обкладинок конденсатора ΔC_0 , далі - зміну ємності заповненого перетворювача за умови аналогічного переміщення

обкладинок конденсатора ΔC_1 , після чого обчислюють співвідношення $\Delta C_1/\Delta C_0$. Така процедура вимірювання є причиною появи додаткової похибки від неточного позиціонування електродів, також важливим фактором є неможливість компенсації додаткової похибки від зміни сорту палива [12].

Запропоновано удосконалену конструкцію вимірювального каналу вологості для здійснення компенсації сортової похибки та істотного зменшення залежності результатів вимірювання від неї.

Розробляється вимірювальний канал вологості призначений для обробки даних, які надходять з ємнісних перетворювачів. За різницею власних частот коливань LC - резонатора можна говорити про стан вологості середовища. Для визначення цієї зміни, можна використовувати первинний вологочутливий ємнісний вимірювальний перетворювач як задаючий елемент LC - резонатора [13].

Вимірювальний канал має два ємнісних датчика. В вимірювальних перетворювачах визначається різниця між частотою коливань LC – резонатору вимірюючого еталонний сипкий матеріал та LC – резонатору вимірюючого вологого сипкого матеріалу, тобто дослідницького зразка. Виходячи з того, що частота коливань у нас пропорційна кількості лічильних імпульсів за час. Таким чином, при зміні частоти LC – резонатора, отримуємо різний час підрахунку імпульсів. Виходячи з цього необхідно використати програмований дільник накопичення імпульсів, який керується мікропроцесором [13, 14].

Мікропроцесор контролює час накопичення імпульсів в дільнику по таймеру. Після того як дільник сформує вихідний імпульс, видається сигнал процесору і фіксується час накопичення. Далі за різницею зразкового і фактичного часу накопичення імпульсів можна визначити рівень вологості сипкого матеріалу. Розроблена структурна схема, представлена на рисунку 2.1.

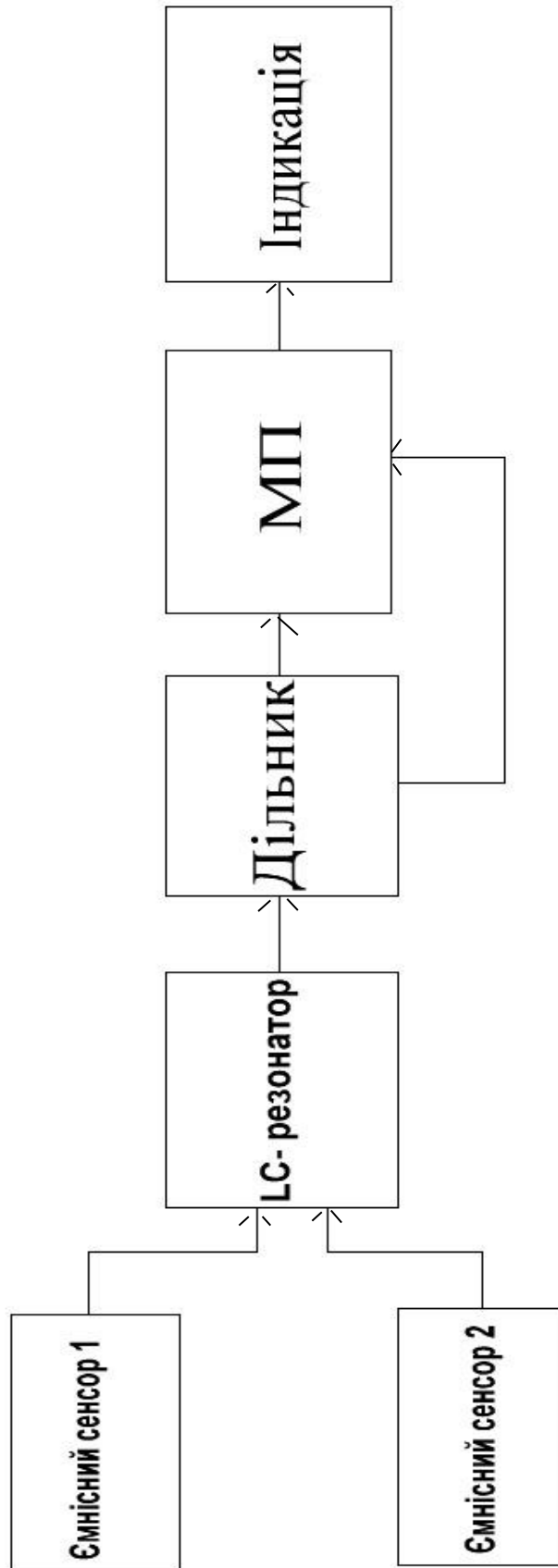


Рисунок 2.1 – Структурна схема вимірювального каналу вологості піску (щебня)

2.2 Розробка функціональної схеми

Відповідно до структурної схемою, представленій вище, була розроблена наступна функціональна схема вимірювального каналу вологості (рисунок 2.2)

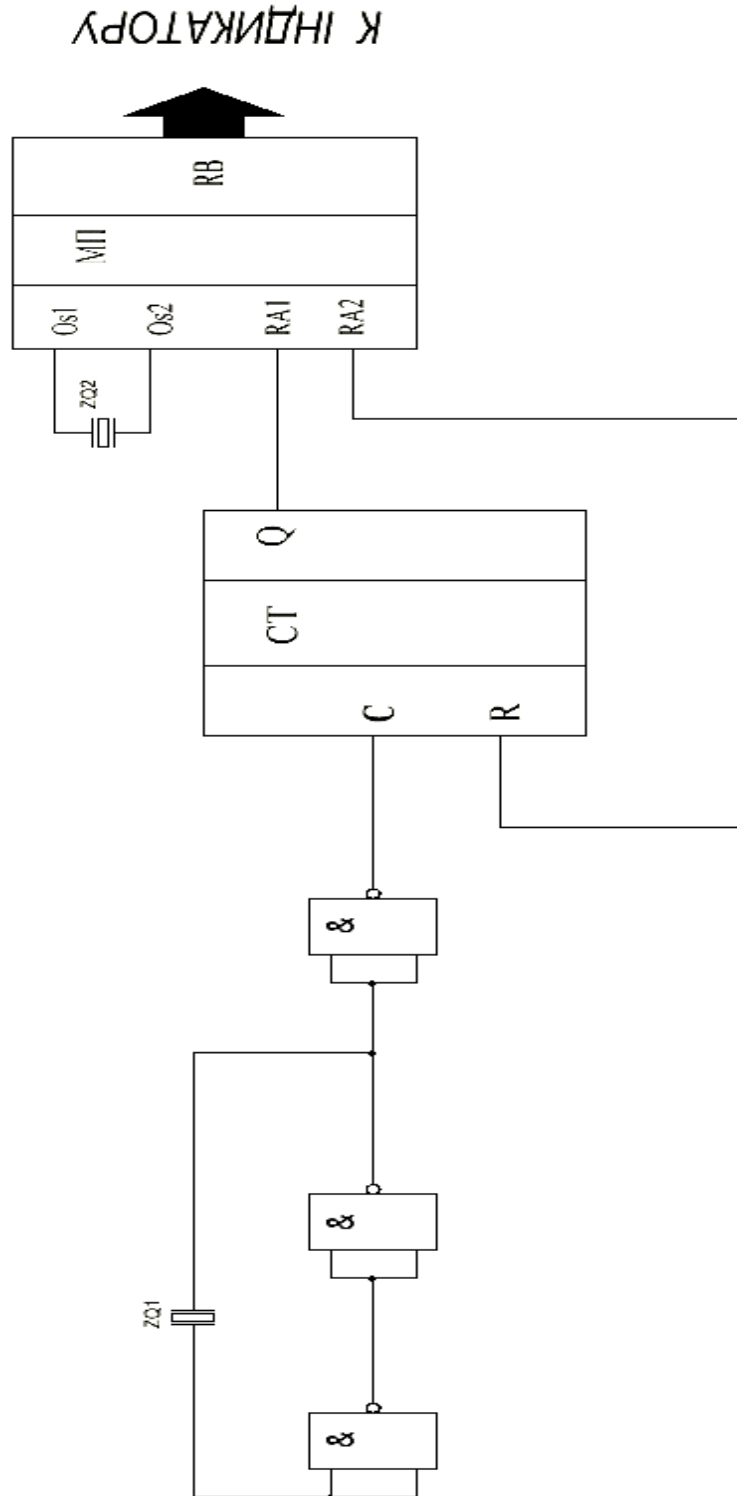


Рисунок 2.2 – Функціональна схема вимірювального каналу вологості

До складу вимірювального каналу вологості входять:

- кварцовий генератор, який виконаний на логічних елементах;
- дільник;
- мікропроцесор, призначений для підрахунку часу накопичених в дільнику імпульсів, його управління, обробки і виведення даних.

2.3 Розробка принципової електричної схеми

Основною частиною пристрою є LC – резонатор. LC – резонатор складається з:

- ZQ1 - кварцовий резонатор РК17С на 4 МГц;
- C1 - конденсатор 120 пФ $\pm 10\%$;
- R1, R2 - резистор від $(0,125 \pm 10\%)$ кОм до $(2,5 \pm 10\%)$ кОм;
- DD1 - ІС 133ЛА3.

Принципова схема LC – резонатору представлена на рисунку 2.3. Задаючим елементом LC – резонатора являється кварц. Основне завдання LC – резонатора - перетворення власної частоти коливань кварцу в частоту коливань LC – резонатора, так що при зміні власної частоти коливань кварцовою пластини в залежності від рівня вологості змінюється і частота LC - резонатора [10, 15].

В якості подільника - мікросхема 555ПЦ1. Керований дільник частоти дозволяє ділити вхідну частоту в 2^N раз ($N=2 \dots 31$). Значення N задається в двійковому коді.

В якості мікропроцесора вибираємо РІС контролер - 16С84: РІС16С84 відноситься до сімейства КМОП мікроконтролерів. Має низьку вартість і високою продуктивністю. Всі команди складаються з одного слова (14 біт шириною) і виконуються за один цикл (400 нс при частоті 10 МГц), крім команд переходу, які виконуються за два цикли (800 нс). РІС16С84 має переривання, що спрацьовує від чотирьох джерел, і вісьмірівневий апаратний стек. Периферія містить у собі 8-бітний таймер-лічильник з 8-бітним

програмованим попереднім дільником (16-бітний таймер) і 13 ліній двонаправленого вводу/виводу.

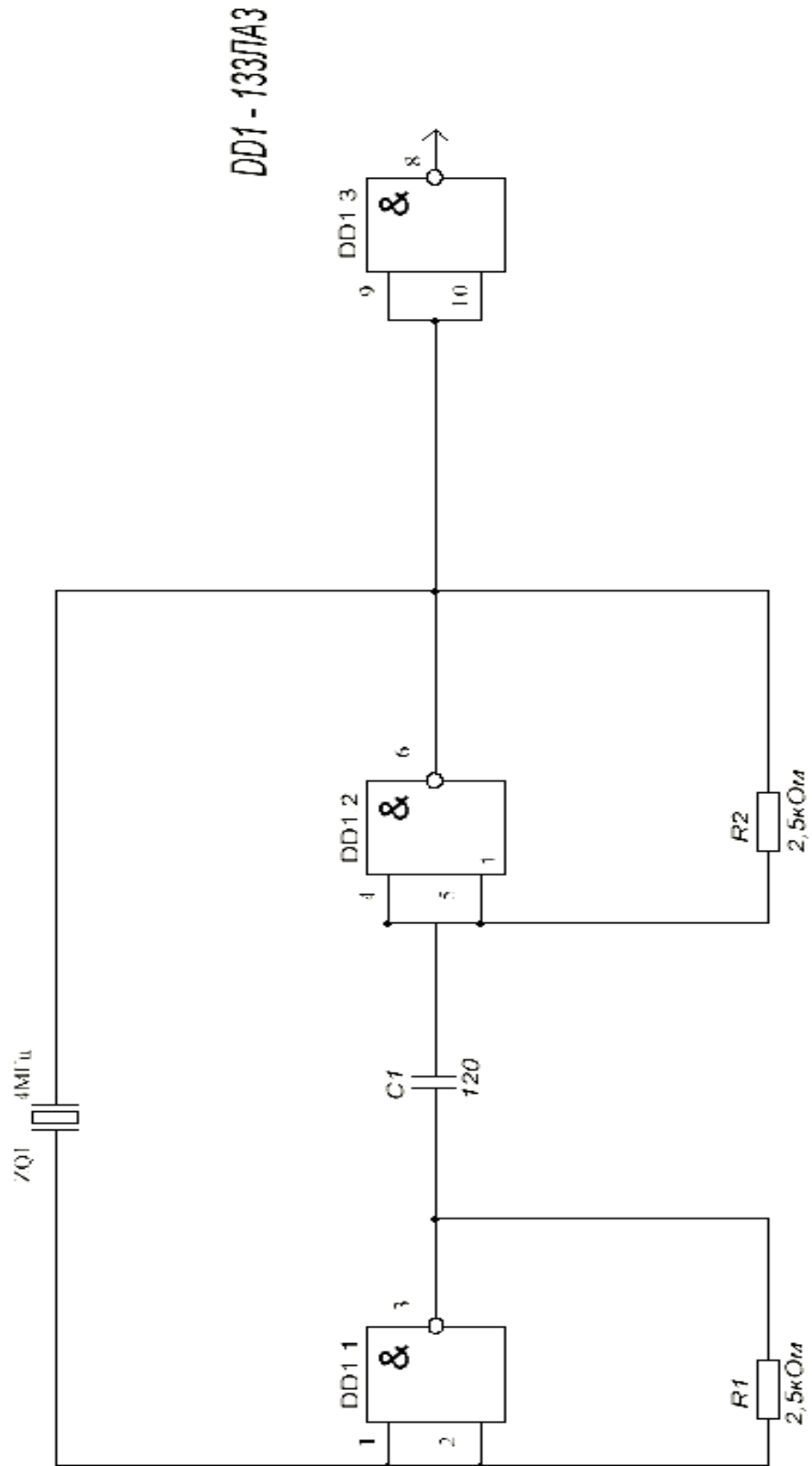
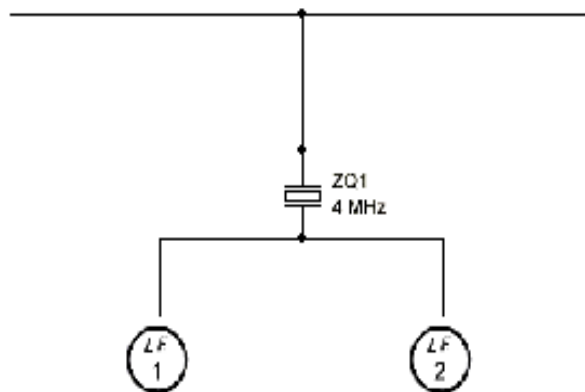


Рисунок 2.3 – Принципова електрична схема вимірювального каналу вологості піску (щебня)

Схема підключення ємнісних сенсорів



$L\epsilon 1$, $L\epsilon 2$ – ємнісні датчики; $ZQ1$ - кварцовий резонатор РК17С на 4 МГц

Рисунок 2.4 – Схема підключення ємнісних сенсорів

Час заповнення дільника при діленні на 2^{21} ($\approx 0,5$ с) при частоті LC - резонатора 4 МГц дорівнює: $0,25 \cdot 10^{-6} \cdot 2^{21} = 524288$ мкс. Так як таймер 8-бітний і максимально накопичує 255 імпульсів, то за цей час таймер здійснює кілька циклів (накопичує і скидає). Число циклів 5140. Після повного заповнення дільника на його виході формується імпульс переривання, яким зупиняється таймер контролера. Значення таймера буде результативним числом. Після чого результати заноситься в пам'ять контролера. Після накопичення 16-ти результатів відбувається їх усереднення. У спеціально виділеній області пам'яті зберігається таблиця відповідності зміни частоти і вологості газового середовища, де і вибирається необхідне значення яке передається на індикатор, який працює у динамічному режимі [2, 4].

При калібруванні вимірювального каналу необхідно, щоб інтервал зміни частот при розкиді вологості від 10 % до 100 %, входив до значення не більше 255. Це максимальне число, яке зберігається в таймері. При цьому досягається максимальна точність, яка дорівнює 1 %.

З метою мініатюризації і перешкодозахищеності каналу виконаємо його у вигляді тонкоплівкової гібридної інтегральної схеми (ГІС).

2.4 Схема підключення індикатора

До вимірювального каналу вологості можна підключити світлодіодні індикатори [16, 10] будь-якого типу. На рисунку 2.5 приведена схема підключення індикатора з загальним катодом.

Необхідність встановлення діода, показаного пунктиром. Діод забезпечує замикання транзисторів і виключає підсвічування непотрібних сегментів. Використовується діод тип - КД105. Транзистори VT1, VT8 на схемі типу КТ209. R10, R17 необхідно підбирають під використовувемий тип індикатора в межах від 50 Ом до 1 кОм. При цьому досягається оптимальна яскравості світіння сегментів.

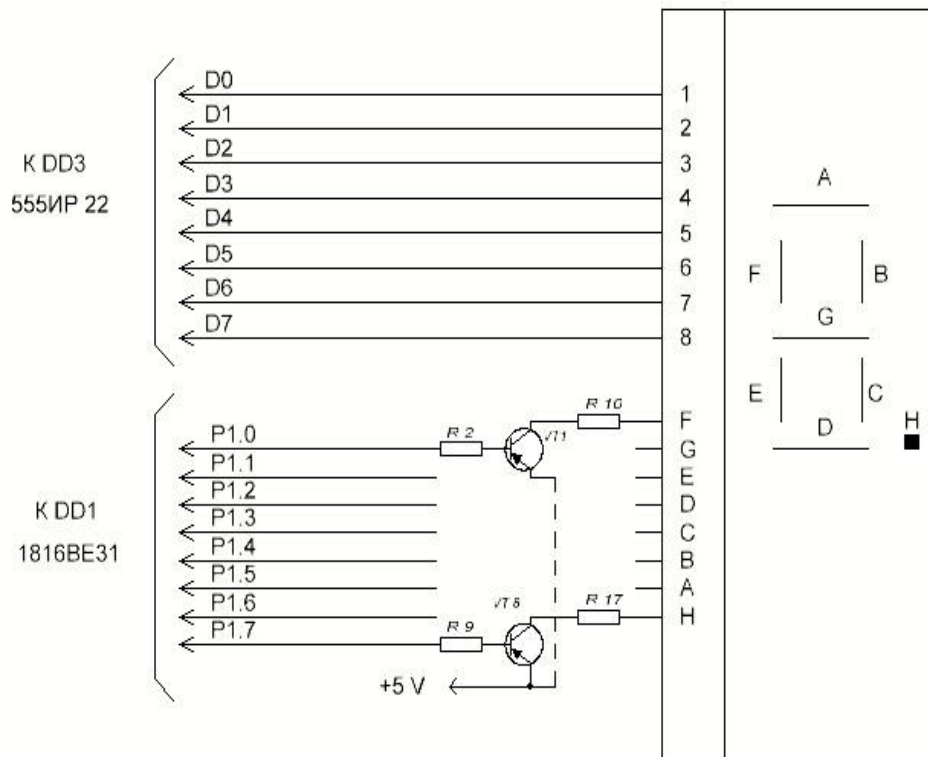


Рисунок 2.5 – Схема підключення індикатора

2.5 Обґрунтування елементної бази

Підложка гібридної інтегральної схеми (ГІС) служать діелектрично підставкою для розташування активних та пасивних елементів. Для забезпечення електричних параметрів мікросхем матеріал підкладки має відповідати наступним вимогам [17, 18]:

- високий коефіцієнт теплопровідності від тепловиділяючих елементів до корпусу;
- мати малий тангенс кута діелектричних втрат;
- мати високу механічну міцність для забезпечення цілісності підкладки з нанесеними на неї елементами;
- мати високу стійкість до впливу температури в процесі нанесення елементів;
- мати стійкість до хімічних речовин в процесі підготовки поверхні до нанесенням елементів при хімічному осадженні.

Крім перерахованих вище можливостей необхідно щоб матеріал підложки мав високий об'ємний та поверхневий опір, в тому числі, в присутності вологи і електролітів.

В повному обсязі перерахованим вимогам не задовольняє ні один матеріал. Виходячи з цього вибір матеріалу засновується на компромісному рішенні.

Виходячи з того, що для гібридних інтегральних схем необхідно забезпечити інтенсивне відведення тепла, то використовують керамічний матеріал полікор. Полікор має високу механічну міцність а також має незначні значення тангенсу кута діелектричних втрат.

Кераміка має значну шорсткість поверхні, що являється її недоліком та ускладнює отримання заданих значень тонкоплівкових елементів. В таблиці 2.1 приведені основні параметри підкладок [4].

Таблиця 2.1 - Основні параметри матеріалів підложки ГІС

Параметри матеріалів	Сіталл СТ-32-1	Сіталл СТ-38-1	Полікор	22ХС (96% Al ₂ O ₃)
Клас чистоти обробки поверхні	14	14	12-14	12
Температурний коефіцієнт лінійного розширення(ТКЛР) при $T =$ від 20 °С до 300 °С $\cdot 10^{-6}$	30...34	83	75...85	60
Діелектрична проникність ϵ при $f = 10^6$ Гц	6...7	7,3...8	10	10,3
Тангенс вуглу діелектричних втрат при $f = 10^6$ Гц і $T = 20^0$ С,	$16 \cdot 10^{-4}$	$15 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-4}$

Параметри резисторів визначаються властивостями застосовуваних резистивних матеріалів, товщиною резистивної плівки та умовами її формування.

Таким чином, чим менше товщина плівки, тим вище буде питомий поверхневий опір ρ_s . Однак при підвищенні опору буде підвищується температурний коефіцієнт опору (ТКО), в наслідок чого отримуємо погіршення температурної стабільності плівок. Виходячи з цього необхідно вибирати матеріал для резисторів враховуючи не тільки величину ρ_s , а і ТКО плівки [1, 4]. Такими матеріалами являються хром, ніхром, ванадій, тантал.

Основні параметри резистивних матеріалів представлені в таблиці 2.2 [17].

Для провідників і контактних майданчиків використовуються різні метали, які мають різну величину електропровідності та міцність зчеплення з підкладкою. Використовуємі матеріали мають невеликий питомий опір, гарне зчеплення з підкладкою та високу корозійну стійкість. Також, матеріал повинен з мінімальними втратами проводити напругу живлення до функціональних компонентів мікросхеми.

Таблиця 2.2 - Електрофізичні параметри резистивних матеріалів

Параметри матеріалів	Ніхром Х20Н80	Хром	Кермет К-50С	Тантал ТВЧ	Сплав МЛТ-3	Сплав РС-3001
Поверхневий опір ρ_s , Ом.	300	500	від 3000 до 10000	20...100	500	від 1000 до 2000
Допустима потужність P_0 , Вт/см ²	2	1	2	3	2	2
ТКО при T від - 60 °С до 125 °С	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$-5 \cdot 10^{-4}$	$-2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$-0,2 \cdot 10^{-4}$
Зміна величини опору резистора після 1000 годин роботи, %	0,4	2	0,3	-	0,4	0,5
Рекомендований матеріал контактних площадок	Мідь	Мідь	Золото	Алюміній	Мідь	Золото

Виходячи з таблиці 2.2 можна зробити висновок, що мідь це один з найбільш використовуваних матеріалів. Мідь характеризується високою електропровідністю, та добрим поєднанням з іншими матеріалами. Питомий поверхневий опір від 0,02 Ом до 0,04 Ом [4].

Обкладки конденсаторів повинні відповідати наступним вимогам: мати високу провідність, корозійну стійкість, технологічну сумісність з матеріалом підкладки та діелектрика конденсатора.

Більшості вимог, які висуваються до матеріалів обкладок, задовольняє алюміній. Матеріал діелектрика конденсатора в значній мірі визначає його характеристики. До діелектрика конденсаторів пред'являються наступні вимоги: висока діелектрична проникність, малий температурний коефіцієнт діелектричної проникності, висока електрична міцність, низькі діелектричні втрати, високий опір ізоляції, гарна адгезія, сумісність з технологічними процесами виготовлення інших елементів мікросхеми.

В якості діелектрика конденсаторів застосовують моноокись кремнію SiO, моноокись германію GeO, оксиди алюмінію Al₂O₃, п'ятиокись танталу Ta₂O₅, титану TiO₂, оксиди рідкісноземельних металів. Основні параметри діелектричних матеріалів конденсаторів наведені в таблиці 2.3 [11, 18].

Таблиця 2.3 - Основні параметри діелектричних матеріалів конденсаторів

Параметри матеріалів	SiO	GeO	Ta ₂ O ₅	Боросилікатне скло
Ємність C ₀ , пФ/см ²	від 5000 до 10000	від 5000 до 15000	від 60000 до 100000	від 2500 до 15000
Електрична міцність E _{пр} , В/см	2...3*10 ⁶	1,0*10 ⁶	2,0*10 ⁶	3...4*10 ⁶
Діелектрична проникність ε при f = 1 МГц	від 5 до 6	від 11 до 12	23	4
Тангенс вуглу діелектричних втрат tgδ при f = 1 МГц	від 0,01 до 0,02	від 0,005 до 0,007	0,02	від 0,001 до 0,0015
Температурний коефіцієнт ємності (ТКЄ) град ⁻¹ при T від - 60 °С до 125 °С,	2*10 ⁻⁴	3*10 ⁻⁴	4*10 ⁻⁴	0,35*10 ⁻⁴
Зміна ємності після роботи 1000 ч, %	1,5	2	-	-

До методів формування тонкоплівкових структур на поверхні підкладки існують вимоги.

Для визначення даних вимог необхідно розглянути вплив методів нанесення плівки на підкладку ГІС. Похибка резистора може бути представлена сумою складових [19, 20]:

$$\Delta_R = \Delta_{ном} + \Delta_l + \Delta_d + \Delta_{mn}, \quad (2.1)$$

де Δ_R - відносна похибка резистора;

$\Delta_{ном}$ - похибка за рахунок питомого опору матеріалу плівки;

$\Delta_l, \Delta_d, \Delta_{mn}$ - похибки за рахунок довжини, ширини резистора, товщини плівки відповідно.

Складові похибки приблизно однакові, а значення $\Delta_R = 10 \%$, маємо значення складових $2,5 \%$. Для товщини плівки рівною 100 \AA значення абсолютної похибки складає $2,5 \text{ \AA}$, що майже дорівнює з товщиною декількох атомних шарів. Таким чином для одержання даних шарів метод нанесення плівки повинен забезпечувати диспергування матеріалу до атомного рівня [10, 14].

Другою вимогою, що пред'являються до методів нанесення тонких плівок, є вимога особливої чистоти середовища, в якому відбувається їх осадження. Будучи об'єктивно необхідним, воно додатково обумовлений рівнем диспергування матеріалу, коли значно полегшується можливість вступу атомів вихідного матеріалу в хімічні з'єднання з матеріалами, забруднюючими середу, в якій відбувається процес осадження.

Третьою вимогою можна назвати вимогу універсальності методу, який дозволяє осаджувати плівки різних матеріалів.

Методи, які задовольняють формуванню тонких плівок:

- метод термовакуумного напилення плівок;
- метод катодного розпилення матеріалів і його модифікації;
- метод осадження з рідкої фази;
- метод осадження із газової фази.

Метод термовакуумного напилення є одним з найбільш універсальних методів отримання плівкових структур самого різного призначення. Широке використання методу ґрунтується на можливості проведення технологічних операцій в контрольованих умовах, це дозволить використання ряду відомих співвідношень геометричної оптики, кінетичної теорії газів, статистичної фізики, термодинаміки і фізики твердого тіла для пояснення ефектів зростання тонко плівкових структур .

Суть методу термовакуумного напилювання полягає в випаровуванні матеріалу, який наноситься при низькому тиску та подальшої його конденсації на поверхні підкладки.

При високій температурі випарника, що відповідає високій щільності потоку пари, малому часу осадження плівки, ймовірність утворення центрів кристалізації набагато вище. Утворюється дрібнокристалічна структура плівки. При високій швидкості випаровування процес стає не контрольованим [17]. При низьких температурах випарника щільність потоку пари менше, швидкість осадження плівки менше, ймовірність утворення хімічних сполук більше, структура крупнокристалічна. Таким чином структура плівки безпосередньо впливає на функціональні властивості матеріалу.

Провідникові матеріали беруть в облогу на холодну підкладку, що забезпечує більш високу провідність, а також менше окислення поверхні.

Резистивні матеріали напилюють на "гарячу підкладку" (від 200 °С до 3000 °С). Даний режим забезпечує кращу адгезію плівки до підкладки. Змінюючи температуру підкладки, можна для деяких резистивних мікрокомпозицій отримати від'ємне значення ТКЄ, що в деяких випадках необхідно.

Температура підкладки і температура випарника визначаються експериментальним шляхом, за результатами дослідження плівок. При цьому враховуються і електрофізичні параметри, величина адгезії, керованість процесів [11, 17].

До матеріалів випарників пред'являються наступні вимоги:

- тиск пари матеріалу випарника повинно бути знехтувати малим;
- між випаровуваним матеріалом і матеріалом випарника не повинно бути хімічної взаємодії;
- випаровується матеріал і матеріал випарника не повинен утворювати сплавів з низькою температурою випаровування;
- випаровується матеріал повинен добре змочувати поверхню випарника.

Таблиця 2.4 – Матеріали випарників

Випаровуваний матеріал	Матеріал випарника
Al	W
Cu	Mo, Ta
Ag	Mo, Ta
Cr	W, Ta
Мікрокомпозиції і сплави	W, Ta

В таблиці 2.4 наведені деякі матеріали, використовувані в основному для випарників з непрямым нагрівом.

Крім випарників з резистивним нагрівом можуть бути використані індукційні випаровувачі, випарники з електронним нагрівом.

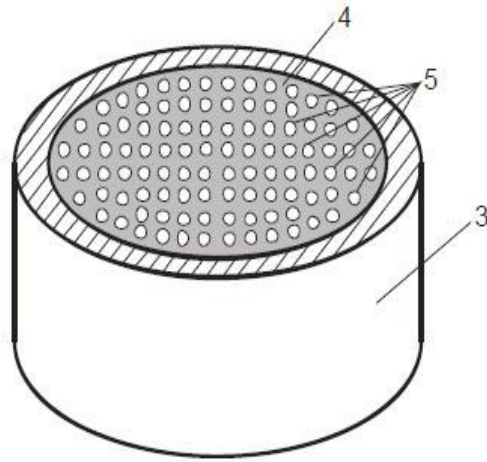
2.6 Вибір ємнісних перетворювачів

Важливою різновидністю вимірювальних перетворювачів являються датчики вологості, так як багато процесів залежать від вологості.

На рисунку 2.6 показано загальний вигляд вологочутливого ємнісного сенсору, який складається з сіткоподібних електродів, які розміщені один навпроти одного так, що розташування отворів у першому електроді збігається з отворами в другому електроді [21]. Електроди 1 та 2 міцно закріплені до діелектричної труби 3, причому вони вкриті шаром полімеру 4 і містять отвори 5 для руху потоку піску, що має діелектричні властивості. Зовнішній діаметр діелектричної труби дорівнює 50 мм, а відстань між електродами – 1,5 мм. На рисунку 2.7 представлено поперечний переріз конструкції вологочутливого ємнісного сенсору [21].

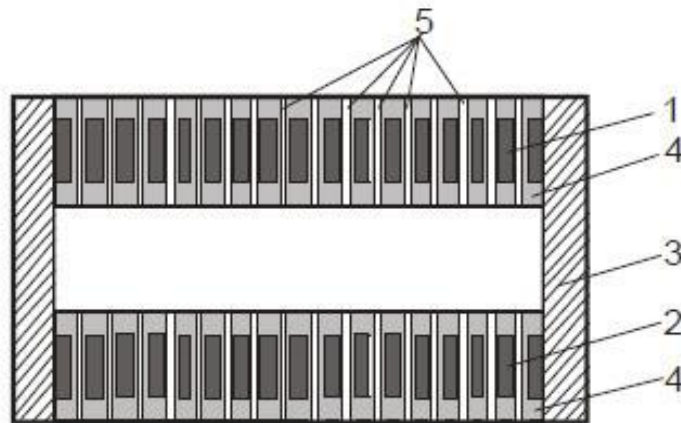
Ємнісний сенсор працює наступним чином. Під час руху потоку піску через діелектричну трубу, в якій міститься вологочутливий ємнісний сенсор для вимірювання вологості, пісок через отвори 5 заповнює простір між електродами 1 і 2, які вкриті шаром полімеру 4 і жорстко закріплені в діелектричній трубі 3. Це викликає зміну діелектричної проникності ємнісного сенсора вологості.

Залежно від зміни вологості вимірювального піску змінюється її діелектрична проникність, отже, змінюється і ємність сенсора вологості [21].



3 - діелектрична труба, 4 - шар полімеру, 5 - отвори

Рисунок 2.6 - Вологочутливий ємнісний сенсор для вимірювання вологості
(загальний вигляд)



1 і 2 – електроди, 3 - діелектрична труба, 4 - шар полімеру

Рисунок 2.7 - Вологочутливий ємнісний сенсор для вимірювання вологості
(поперечний переріз)

2.7 Визначення характеристик вологочутливого ємнісного сенсору

Якщо матеріал складається із суміші компонентів з різною діелектричною проникністю, то загальну поляризацію матеріалу можна знайти як суму поляризації компонентів [4, 6, 21]. У нашому випадку для знаходження загальної діелектричної проникності $\varepsilon_{заг}$ потрібно врахувати діелектричну проникність гетерогенної суміші води та піску ε_c , у якій частинки розміщені хаотично, та діелектричну проникність полімеру $\varepsilon_{п}$.

Для цього визначимо спочатку діелектричну проникність гетерогенної суміші води та піску ε_c . Молекули води є дисперсною фазою, а дисперсним середовищем відповідно є пісок. Для оцінювання ε_c запропоновано емпіричне рівняння Бруггемана:

$$\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_c}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} = (1 - \alpha) \sqrt[3]{\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_2}}, \quad (2.2)$$

де ε_1 – діелектрична проникність води;

ε_2 – діелектрична проникність піску;

α – об’ємна концентрація води.

Вода належить до речовин, які здатні поляризуватись, тому для визначення значення діелектричної проникності води скористаємось комплексною діелектричною проникністю води [21]:

$$\varepsilon_1^* = \varepsilon_1' - j(\varepsilon_1' \cdot \operatorname{tg} \delta_1), \quad (2.3)$$

де ε_1^* – комплексна діелектрична проникність води;

ε_1' – дійсна складова комплексної діелектричної проникності води;

$\operatorname{tg} \delta_1$ – тангенс кута діелектричних втрат води.

Дійсна складова комплексної діелектричної проникності води ε'_1 та тангенс кута діелектричних втрат $tg\delta_1$, своєю чергою, розраховуються з рівнянь [21]:

$$\varepsilon'_1 = \varepsilon_{o1} \frac{\varepsilon_{c1} - \varepsilon_{o1}}{1 + (\omega\tau_1)^2},$$

$$tg\delta_1 = \frac{(\varepsilon_{c1} - \varepsilon_{o1}) \cdot \omega\tau_1}{\varepsilon_{c1} + \varepsilon_{o1} + (\omega\tau_1)^2}, \quad (2.5)$$

де ε_{o1} – оптична діелектрична проникність води;

ε_{c1} – статична діелектрична проникність води;

ω – частота електричного поля, Гц;

τ_1 – час релаксації молекул води, с.

Релаксаційні втрати води визначаються з рівняння [13, 21]:

$$\tau_1 = \frac{4\pi\eta_1 a_1^3}{kT}, \quad (2.6)$$

де η_1 – коефіцієнт динамічної в'язкості води, Па·с;

a_1 – радіус молекули води, м;

k – стала Больцмана, Дж/К;

T – температура, К.

Коефіцієнт динамічної в'язкості води визначається як добуток коефіцієнта кінематичної в'язкості на густину води [21]:

$$\eta_1 = \nu_1 \cdot \rho_{H_2O}, \quad (2.7)$$

де ν_1 – коефіцієнт кінематичної в'язкості води, м²/с;

ρ_{H_2O} – густина води, кг/м^3 .

Коефіцієнт кінематичної в'язкості води та густина води, своєю чергою, визначаються з емпіричних рівнянь [21]:

$$v_1 = \frac{v_{01}}{1 + 0,0337 \cdot (T - T_0) + 0,000221 \cdot (T - T_0)^2}, \quad (2.8)$$

$$\rho_{H_2O} = \frac{995,7}{0,984 + 0,483 \cdot 10^{-3} (T - T_0)}, \quad (2.9)$$

де v_{01} – коефіцієнт кінематичної в'язкості води при температурі T_0 , $\text{м}^2/\text{с}$;

T_0 – температура, яка дорівнює 273 К.

Знайдемо модуль комплексної діелектричної проникності води [13, 21]:

$$\varepsilon_1 = \sqrt{(\varepsilon'_1)^2 + (\varepsilon'_1 \cdot \text{tg} \delta_1)^2}. \quad (2.10)$$

Для визначення значення діелектричної проникності піску скористаємось комплексною діелектричною проникністю піску [13, 21]:

$$\varepsilon_2^* = \varepsilon'_2 - j(\varepsilon'_2 \cdot \text{tg} \delta_2), \quad (2.11)$$

де ε_2^* – комплексна діелектрична проникність нафтопродукту;

ε'_2 – дійсна складова комплексної діелектричної проникності піску;

$\text{tg} \delta_2$ – тангенс кута діелектричних втрат піску.

Дійсна складова комплексної діелектричної проникності піску ε'_2 та тангенс кута діелектричних втрат $\text{tg} \delta_2$, своєю чергою, розраховуються з рівнянь (2.8) та (2.9):

$$\varepsilon'_2 = \varepsilon_{o2} + \frac{\varepsilon_{c2} - \varepsilon_{o2}}{1 + (\omega\tau_2)^2},$$

$$\operatorname{tg} \delta_2 = \frac{(\varepsilon_{c2} - \varepsilon_{o2}) \cdot \omega\tau_2}{\varepsilon_{c2} + \varepsilon_{o2} \cdot (\omega\tau_2)^2}, \quad (2.12)$$

де ε_{o2} – оптична діелектрична проникність піску;

ε_{c2} – статична діелектрична проникність піску;

τ_2 – час релаксації піску, с.

Релаксаційні втрати піску визначаються з рівняння (2.8) та (2.9):

$$\tau_2 = \frac{4\pi\eta_2 a_2^3}{kT}, \quad (2.13)$$

де η_2 – коефіцієнт динамічної в'язкості піску, Па·с;

a_2 – радіус молекули піску, м.

Коефіцієнт динамічної в'язкості піску визначається як добуток коефіцієнта кінематичної в'язкості на густину піску (2.9):

$$\eta_2 = \nu_2 \cdot \rho, \quad (2.14)$$

де ν_2 – коефіцієнт кінематичної в'язкості піску, м²/с;

ρ – густина піску, кг/м³.

Коефіцієнт кінематичної в'язкості піску та густина піску, своєю чергою, визначаються з емпіричних рівнянь:

$$\nu_2 = \frac{\nu_{02}}{\left(1 + 0,0337 \cdot (T - T_0) + 0,000221 \cdot (T - T_0)^2\right) \left(\frac{T}{T_0}\right)^2}, \quad (2.15)$$

$$\rho = \frac{874,2}{0,984 + 0,483 \cdot 10^{-3}(T - T_0)}, \quad (2.16)$$

де ν_{02} – коефіцієнт кінематичної в'язкості піску при температурі T_0 , м²/с.

Знайдемо модуль комплексної діелектричної проникності піску:

$$\varepsilon_2 = \sqrt{(\varepsilon'_2)^2 + (\varepsilon'_2 \cdot \operatorname{tg} \delta_2)^2}. \quad (2.17)$$

Для визначення об'ємної концентрації води α скористаємось виразом:

$$\alpha = \frac{V_{H_2O}}{V_{\text{суміші}}},$$

$$V_{\text{суміші}} = V_{H_2O} + V, \quad (2.18)$$

де V_{H_2O} , $V_{\text{суміші}}$, V – об'єми води, піску та суміші відповідно, м³.

Визначимо об'єм води V_{H_2O} :

$$V_{H_2O} = \frac{m_{H_2O}}{\rho_{H_2O}}, \quad (2.19)$$

де m_{H_2O} – маса води, кг.

Підставивши вирази (2.18) і (2.19), отримаємо:

$$\alpha = \frac{m_{H_2O}}{\rho_{H_2O} \cdot \left(\frac{m_{H_2O}}{\rho_{H_2O}} + V \right)}. \quad (2.20)$$

Запишемо вираз для масової вологості W [21]:

$$W = \frac{m_{H_2O}}{m_{\text{суміші}}} \cdot 100\% ,$$

$$m_{H_2O} = \frac{W \cdot m}{100 - W} , \quad (2.21)$$

де m , $m_{\text{суміші}}$ – маси піску та суміші відповідно, кг.

Підставивши значення m_{H_2O} з виразу (2.21) в (2.20), отримаємо:

$$\alpha = \frac{W \cdot \rho}{(100 - W) \cdot \rho_{H_2O} + W \cdot \rho} . \quad (2.22)$$

З урахуванням усіх вищенаведених розрахунків підставимо вираз (2.10), (2.17) та вираз (2.22) у рівняння (2.2). Виразивши з рівняння (2.2) ε_c , отримаємо рівняння для визначення діелектричної проникності гетерогенної суміші води та піску.

Загальна діелектрична проникності сенсора $\varepsilon_{\text{заг}}$ визначається з емпіричного рівняння Ліхтенекера як діелектрична проникність двошарової структури, у якій першим шаром є полімер, а другим - гетерогенна суміш води та піску [12, 21]:

$$\varepsilon_{\text{заг}} = \frac{\varepsilon_n \varepsilon_c}{\beta_1 \varepsilon_c + \beta_2 \varepsilon_n} , \quad (2.23)$$

де β_1 – об'ємна концентрація шару полімеру між електродами;

β_2 – об'ємна концентрація гетерогенної суміші води та піску.

Знайдемо об'ємні концентрації β_1 та β_2 :

$$\beta_1 = \frac{2Sh}{2Sh + \pi R^2 (d - 2h)}$$

$$\beta_2 = 1 - \beta_1, \quad (2.24)$$

де S – активна площа електрода, м^2 ;

h – товщина шару полімеру, м ;

R – радіус електрода, м ;

d – відстань між електродами, м .

Для розрахунку ємності вологочутливого сенсора з сіткоподібними електродами скористаємось формулою:

$$C = \frac{\varepsilon_{\text{заг}} \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d}, \quad (2.25)$$

з урахуванням активної площі електродів S , а також усіх вищенаведених виразів рівність (2.25) матиме вигляд:

$$C = \frac{\varepsilon_n \varepsilon_c \varepsilon_0 (\pi R^2 - p \pi R_0^2)}{d (\beta_1 \varepsilon_c + \beta_2 \varepsilon_n)}, \quad (2.26)$$

де ε_0 – діелектрична проникність вакууму, Ф/м ;

R_0 – радіус отвору, м ;

p – кількість отворів у електроді.

Згідно з виразом (2.26) була розрахована ємність вологочутливого сенсору з сіткоподібними електродами. На рисунку 2.8 подано теоретична та експериментальна залежності ємності вологочутливого сенсору від вологості піску, в діапазоні від 0 % до 30 % масової вологості.

Проаналізувавши графіки можна зробити висновок, що теоретичні та експериментальні залежності мають збіг. При зміні масової вологості від 0 % до 30 % ємність збільшується від 20 пФ до 44 пФ. Таким чином, адекватність математичної моделі можна оцінити за відносною похибкою, яка досягає значення 3 %.

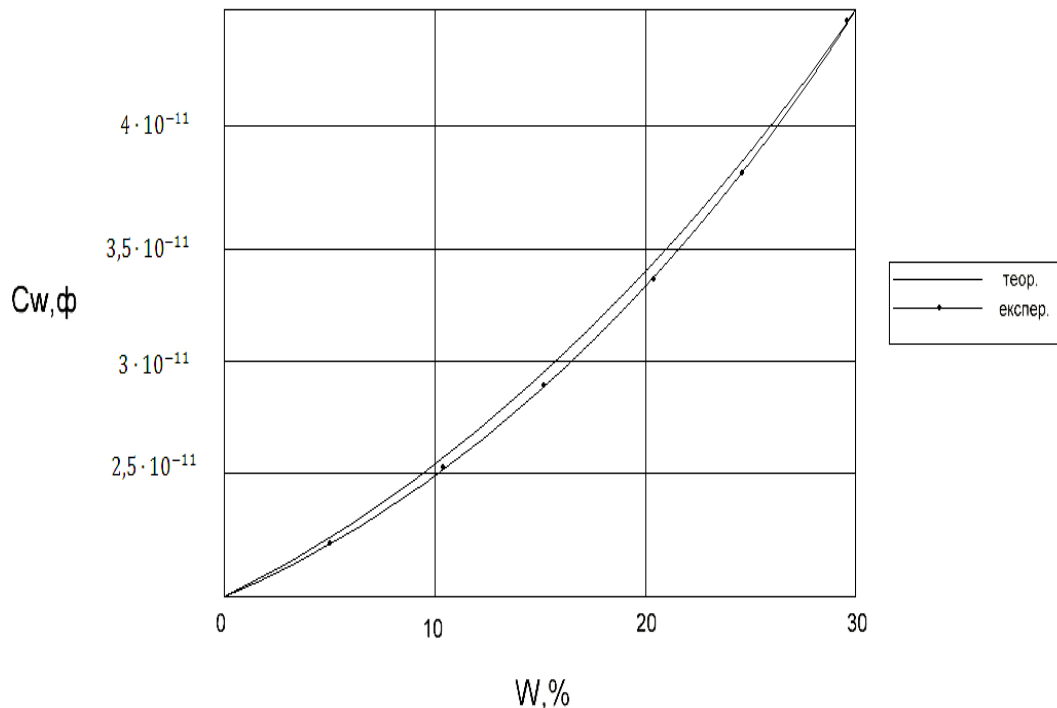


Рисунок 2.8 - Експериментальна та теоретична залежності зміни ємності від вологості піску (щєбня)

Розроблено модель ємнісного сенсора вологості і математичну модель, яка описує залежність електричної ємності від величини вологості сипких матеріалів (піску та щєбня). У вимірювальному каналі вологості –перетворювач являє собою конденсатор з сіткоподібними електродами. Дані електроди закріплені у діелектричній трубці. Чутливість датчика для піску (щєбня) становить близько $0,8 \frac{n\Phi}{\%}$, а розбіжність теоретичних та експериментальних результатів становить 3 % [21].

3 РОЗРАХУНОК СКЛАДОВИХ ПОХИБКИ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ ВОЛОГОСТІ

Діелькометричний метод вимірювання є широко поширеним у вологометрії сипких матеріалів: піску (щебня) тощо. Окрім вологості, на ефективну діелектричну проникність (ДП) сипкої речовини істотно впливають різні фактори, що викликають з'явлення додаткових похибок вимірювання. Типовими джерелами додаткових похибок є зміна сорту досліджуваної речовини, змінний гранулометричний склад і форма часток матеріалу, змінна густина, неідентичність процесу ущільнення, сегрегація під час ущільнення, відмінність умов заповнення первинного перетворювача.

Широкий спектр факторів, які негативно впливають на точність результату вимірювання, а також неможливість задовільної компенсації їх впливу на результат вимірювання є причинами того, що сучасні експресні засоби вимірювання, навіть за умов використання мікроконтролерів зі зберіганням статистичних даних та градуювальних кривих не здатні подолати бар'єр у 0,5 % абсолютної похибки вимірювання вологості [12, 21].

У первинних перетворювачах зі змінним положенням обкладинок конденсаторів спочатку визначають зміну ємності незаповненого перетворювача за умов зміни положення обкладинок конденсатора ΔC_0 , далі - зміну ємності заповненого перетворювача за умови аналогічного переміщення обкладинок конденсатора ΔC_1 , після чого обчислюють співвідношення $\Delta C_1/\Delta C_0$. Данна процедура вимірювання є причиною появи додаткової похибки від неточного позиціонування електродів, також важливим фактором є неможливість компенсації додаткової похибки від зміни сорту палива [21].

Запропоновано удосконалену конструкцію первинного вимірювального перетворювача для здійснення компенсації сортової похибки та істотного зменшення залежності результатів вимірювання від неї.

Метою дослідження є теоретичне обґрунтування запропонованого у принципі вимірювання вологості шляхом аналізу метрологічних характе-

ристик наведеної там же конструкції первинного вимірювального перетворювача, а саме з'ясування, наскільки істотний вплив змінного гранулометричного складу матеріалу на результат вимірювання та здатна нова конструкція компенсувати додаткову похибку від змінного гранулометричного складу матеріалу порівняно з більш ранніми аналогами.

3.1 Визначення ємності первинного перетворювача вологості

Відповідно що [21] первинний перетворювач утворений чотирма електричними конденсаторами з ємностями C_1 , C_2 , C_3 , C_4 , які призначено для заповнення матеріалом. Електричні ємності цих конденсаторів мають відповідати умовам $C_2 > C_1$, $C_3 > C_4$, $C_1 = C_4$, $C_3 = C_2$. Конденсатори C_1 та C_2 утворюють окрему частину первинного перетворювача, яку заповнюють досліджуваним матеріалом невідомої вологості, а конденсатори C_3 та C_4 - його другу складову частину, яку заповнюють зневодненим матеріалом із тієї ж партії, що і досліджуваний.

Ємність одинарного первинного перетворювача, (рисунок 3.1), визначають як [21]:

$$C = C_{01} + C_{02} + C_{03},$$

$$C_{01} = \varepsilon_0 \varepsilon \left[g_{01} + 2(g_{21} + g_{41} + g_{61} + g_{81} + 2g_{101} + 2g_{121}) \right] \cdot 12,$$

$$C_{02} = \varepsilon_0 \varepsilon \left[g_{02} + 2(g_{22} + g_{42} + g_{62} + g_{82} + 2g_{102} + 2g_{122}) \right] \cdot 2. \quad (3.1)$$

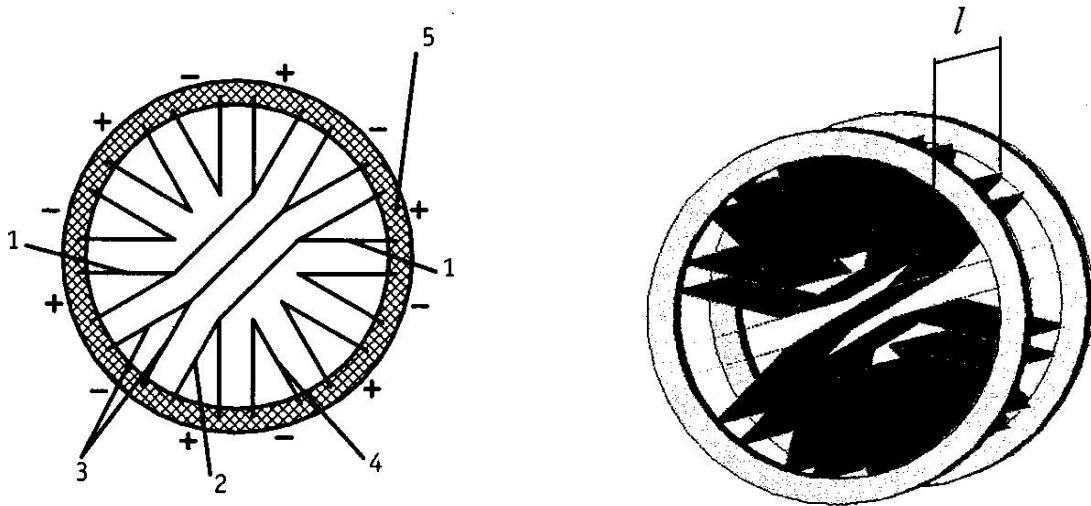


Рисунок 3.1 - Базова конструкція одинарного первинного вимірювального перетворювача вологості

Дана конструкція має такі елементи як 1, 2, 3, 4 - система електродів спеціальної форми; 5 - діелектричні кільця; g_{01} , g_{02} - просторові характеристики основного поля; g_{21} , g_{22} - половина циліндра у сторони l ; g_{41} , g_{42} - половина циліндра у сторони L ; g_{61} , g_{62} - половина труби у сторони l ; g_{81} , g_{82} - половина труби у сторони L ; g_{101} , g_{102} - шарові квадранти; g_{121} , g_{122} - квадранти шарової оболонки.

Геометричні розміри електродів є такими (рисунок 3.1):

- довжина електродів $l = 50$ мм;
 - відстань між електродами $Z = 20$ мм;
 - внутрішній діаметр діелектричних кілець $D = 150$ мм;
 - ширина V - подібного електрода $L = 0,5\sqrt{D^2 - Z^2} - 1,866 \cdot Z = 37$ мм;
- ширина центрального електрода $d_1 = 3,8642 \cdot Z = 77,28$ мм;
- ширина бічних електродів відносно центрального електрода $d_1 = 3,3462 \cdot Z = 66,92$ мм.

Обчислимо просторові характеристики, які утворюють електричні ємності C_{01} , C_{02} згідно з таблицями 3.1 та 3.2.

Таблиця 3.1 - Результати розрахунку просторових характеристик ємності C_{01}

Просторова характеристика	Розрахункова формула	Результат, м
g_{01}	$L \cdot l / Z$	0,0925
g_{21}	$0,26l$	0,0130
g_{41}	$0,26L$	0,0096
g_{61}	$\frac{l}{\pi} \ln \left(\frac{2m}{Z} + 1 \right)$	0,0015
g_{81}	$\frac{l}{\pi} \ln \left(\frac{2m}{Z} + 1 \right)$	0,0011
g_{101}	$0,077Z$	0,00154
g_{121}	$m/4$	0,00025

Таблиця 3.2 - Результати розрахунку просторових характеристик ємності C_{02}

Просторова характеристика	Розрахункова формула	Результат, м
g_{02}	$d_1 \cdot l / Z$	0,1673
g_{22}	$0,26l$	0,0130
g_{42}	$0,26d_1$	0,0170
g_{62}	$\frac{l}{\pi} \ln \left(\frac{2m}{Z} + 1 \right)$	0,0015

Параметром m у таблиці 3.1 позначено товщину металевих пластин (дорівнює 1 мм), які утворюють електроди. У подальших розрахунках просторові характеристики g_{61} , g_{81} , g_{101} , g_{121} , не беруть до уваги.

Обчислимо ємності C_{01} та C_{02} повітрі [21]:

$$C_{01} = \varepsilon_0 \varepsilon \left[g_{01} + 2(g_{21} + g_{41}) \right] \cdot 12 = 14,624 \text{ пФ},$$

$$C_{02} = \varepsilon_0 \varepsilon \left[g_{02} + 2(g_{22} + g_{42}) \right] \cdot 2 = 4,023 \text{ пФ}. \quad (3.2)$$

Відповідно до [21] у розрахунки необхідно ввести ємність C_{03} , яка визначається за виразом:

$$C_{03} = \varepsilon_0 \varepsilon \left[2 \left(0,52l + \frac{2l}{\pi} \ln \left(\frac{2m}{Z} + 1 \right) \right) \right] \cdot 4 = 2,053 \text{ пФ}. \quad (3.3)$$

Таким чином, електрична ємність одинарного первинного перетворювача у повітрі [21]:

$$C = C_{01} + C_{02} + C_{03} = 20,7 \text{ пФ}. \quad (3.4)$$

3.2 Оцінка впливу зміни діелектричної проникності матеріалу

Як показано у роботі [5], зміна гранулометричного складу сипкого матеріалу викликатиме зміну діелектричної проникності цього матеріалу. Оцінити цей вплив для матеріалів із реальною формою часток надто складно, і тому у [5] вводять певні спрощення і розглядають частки матеріалу сферичної форми. Тому у наших дослідженнях також фігурують частки сферичної форми змінного радіусу: радіусом 1 мм (дрібний пісок) і радіусом 2,5 мм (великий пісок). Діелектрична проникність матеріалу часток ε_1 для обох випадків є однаковою і дорівнює 2.

Зважаючи на те, що корисний об'єм первинного перетворювача вологості є фіксованим (вимірювання здійснюються за стандартних умов навколишнього середовища), а радіус однієї частки сипкого матеріалу, як означено вище, змінюватиметься від 1 мм до 2,5 мм, у двох граничних випадках корисний простір первинного перетворювача заповнюватиме різну кількість часток сипкого матеріалу, і фактичний об'єм досліджуваної сировини у просторі перетворювача змінюватиметься. Саме це і впливатиме на зміну діелектричної проникності матеріалу у вимірювальному просторі [5].

Для оцінювання цього впливу та його математичної формалізації авторами обрано відому формулу Ліхтенекера:

$$\lg \varepsilon_{см} = \beta_1 \lg \varepsilon_1 + \beta_2 \lg \varepsilon_2 + \beta_3 \lg \varepsilon_3, \quad (3.5)$$

де $\varepsilon_{см}$ - діелектрична проникність суміші «сипкий матеріал - вода - повітря»;

β_1 - об'ємна концентрація сипкого матеріалу;

ε_1 - діелектрична проникність сипкого матеріалу;

β_2 - об'ємна концентрація води;

ε_2 - діелектрична проникність води;

β_3 - об'ємна концентрація повітря;

ε_3 - діелектрична проникність повітря.

Дана формула дозволяє враховувати об'єми компонентів, з яких складається досліджувана суміш. У нашому випадку будівну масу розглядатимемо як суміш умовно сухого піску, води й повітря.

Значення параметрів $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ однозначно залежать від густини суміші $\rho_{см}$ та її вологості W . Якщо ρ_1, ρ_2, ρ_3 , - значення густин відповідно піску, води та повітря, тоді можемо записати [3, 21]:

$$V_1 = \beta_1 V_{см}, V_2 = \beta_2 V_{см}, V_3 = \beta_3 V_{см}, \quad (3.6)$$

де $V_{см}$ - об'єм суміші «сипкий матеріал - вода - повітря»;

V_1 - об'єм сипкого матеріалу;

V_2 - об'єм води;

V_3 - об'єм повітря;

З урахуванням (3.6) значення мас m_1, m_2, m_3 (масу умовно сухого піску, води й повітря відповідно) можна представити так [5, 21]:

$$m_1 = V_1 \rho_1 = \beta_1 \rho_1 V_{см}, m_2 = V_2 \rho_2 = \beta_2 \rho_2 V_{см}, m_3 = V_3 \rho_3 = \beta_3 \rho_3 V_{см}. \quad (3.7)$$

Виходячи з (3.7), формулу для визначення вологості можна записати:

$$W = \frac{\beta_2 p_2 V_{cm}}{\beta_1 p_1 V_{cm}} = \frac{\beta_2 p_2}{\beta_1 p_1} \quad (3.8)$$

Густину суміші «сипкий матеріал - вода - повітря» визначимо так [5]:

$$\rho_{cm} = \beta_1 \rho_1 + \beta_2 \rho_2 + \beta_3 \rho_3. \quad (3.9)$$

Враховуючи, що:

$$\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 = 1 \quad (3.10)$$

з системи рівнянь (3.8) - (3.10) знаходимо значення параметрів β_1 і β_2 [5]:

$$\beta_1 = \frac{\rho_{cm}}{\rho_1} \cdot \frac{1}{1+W}, \quad \beta_2 = \frac{\rho_{cm}}{\rho_2} \cdot \frac{1}{1+W}. \quad (3.11)$$

Знаючи, що $\varepsilon_3 = 1$, формула із урахуванням (3.11) матиме вигляд [12]:

$$\lg \varepsilon_{cm} = \frac{\rho_{cm}}{1+W} \cdot \left(\frac{\lg \varepsilon_1}{\rho_1} + \frac{W \lg \varepsilon_2}{\rho_2} \right). \quad (3.12)$$

Вираз (3.12) повинен враховувати зміну фактичного об'єму сипкого матеріалу в середині об'єму V_{Π} первинного вимірювального перетворювача і потребує певних перетворень. Густину суміші ρ_{cm} виразимо через об'єми її компонентів:

$$m_{cm} = m_1 + m_2 + m_3, \quad m_1 - \text{var}, \quad m_2 - \text{const}, \quad m_3 \rightarrow 0.$$

де m_{cm} - маса суміші «сипкий матеріал - вода - повітря»;

m_1 - маса сипкого матеріалу;

m_2 - маса води;

m_3 - маса повітря.

$$m_{cm} = p_1V_1 + p_2V_2, \rho_{cm}V_n = p_1V_1 + p_2V_2, \rho_{cm} = \frac{p_1V_1 + p_2V_2}{V_n}. \quad (3.13)$$

Підставивши вираз (3.13) у вираз (3.12) і виразивши ε_{cm} отримаємо:

$$\varepsilon_{cm} = 10 \frac{p_1V_1 + p_2V_2}{V_n} \left(\frac{\lg \varepsilon_1}{p_1} + \frac{W \lg \varepsilon_2}{p_2} \right). \quad (3.14)$$

Далі необхідно з'ясувати, як зміна гранулометричного складу сипкого матеріалу для означених вище умов впливатиме на фактичний об'єм піску V_1 , здатного розміститися у корисному об'ємі первинного перетворювача V_n .

Об'єм однієї частки сипкого матеріалу з радіусами 1 мм і 2,5 мм відповідно обчислимо за відомою формулою [5, 11]:

$$V_{r1} = \frac{4}{3} \pi r^3 = 4,19 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3, V_{r2,5} = \frac{4}{3} \pi r^3 = 6,54 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3. \quad (3.15)$$

Вимірювальний об'єм первинного перетворювача дорівнює [21]:

$$V_n = L \cdot l \cdot Z \cdot 12 + d_1 \cdot l \cdot Z \cdot 2 = 0,000578 \text{ м}^3 \quad (3.16)$$

Кількість часток матеріалу, здатних розміститися у корисному об'ємі первинного перетворювача за умов кубічного укладання, для часток радіусом 1 мм дорівнює $N_1 = 70500$, для часток радіусом 2,5 мм $N_2 = 4400$.

Загальні об'єми часток радіусами 1 мм і 2,5 мм ($V_{\Sigma r1}$ і $V_{\Sigma r2}$ відповідно) є рівними [5, 11]:

$$V_{\Sigma r1} = V_{r1}N_1 = 0,0002954 \text{ м}^3, \quad V_{\Sigma r2} = V_{r2}N_2 = 0,00028776 \text{ м}^3. \quad (3.17)$$

Використовуємо формулу для умов: $W = 0$, радіус часток – 1 мм, густина піску $\rho_1 = 1336 \text{ кг/м}^3$:

$$\varepsilon_{cm} = \frac{\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2}{V_n(1+W)} \left(\frac{\lg \varepsilon_1}{\rho_1} + \frac{W \lg \varepsilon_2}{\rho_2} \right) = 10 \frac{\rho_1 V_1}{V_n} \left(\frac{\lg \varepsilon_1}{\rho_1} \right) = 1,42 \quad (3.18)$$

Зрозуміло, що за відсутності вологи діелектрична проникність піску повинна дорівнювати 2 ($\varepsilon_1=2$), тому необхідно увести поправку [5, 21]:

$$N = \frac{2}{\varepsilon_{cm}} = 1,41. \quad (3.19)$$

Таким чином:

$$\varepsilon_{cm} = N \cdot 10 \frac{\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2}{V_n(1+W)} \left(\frac{\lg \varepsilon_1}{\rho_1} + \frac{W \lg \varepsilon_2}{\rho_2} \right) \quad (3.20)$$

Обчислимо діелектричну проникність піску радіусами 1 мм і 2,5 мм за наявності води ($W=20\%$) згідно з виразом (3.20) [21]:

$$\varepsilon_{cmr1} = 1,41 \cdot 10 \frac{1336 \cdot 0,0002954 + 1000 \cdot 0,0001156}{0,000578(1+0,2)} \left(\frac{\lg 2}{1336} + \frac{0,21 \lg 80}{1000} \right) = 3,935,$$

$$\varepsilon_{cmr_2} = 3,857. \quad (3.21)$$

Необхідно визначити, як впливатиме зміна гранулометричного складу сипкого матеріалу на зміну електричної ємності одинарного первинного вимірювального перетворювача вологості за наявності води ($W=20\%$). Як було обчислено вище, ємність такого первинного перетворювача у повітрі дорівнює $C = 20,7$ пФ.

Для сипких матеріалів змінного гранулометричного складу маємо [5]:

$$C_{r_1} = C\varepsilon_{cmr_1} = 81,45 \text{ пФ},$$

$$C_{r_2} = C\varepsilon_{cmr_2} = 79,84 \text{ пФ}. \quad (3.22)$$

Діелектричну проникність умовно сухого піску з радіусом часток 2,5 мм обчислимо за формулою (3.20):

$$\varepsilon_{cmr_2сух} = 1,987, \quad (3.23)$$

у той час як $\varepsilon_{cmr_1сух} = 2$.

Для умовно сухого сипкого матеріалу:

$$C_{r_1сух} = C\varepsilon_{cmr_1сух} = 41,4 \text{ пФ},$$

$$C_{r_2сух} = C\varepsilon_{cmr_2сух} = 41,13 \text{ пФ}. \quad (3.24)$$

Статичну характеристику перетворення сформуємо як [5]:

$$W = \frac{N_{r_1} - N_{r_{1\text{сух}}}}{E}. \quad (3.25)$$

Звідки:

$$E = 2,0025,$$

де E - масштабний коефіцієнт статичної характеристики перетворення, яку вважаємо лінійною.

Отже, якщо здійснити обчислення вологості сипкого матеріалу з радіусом часток 1 мм за формулою (3.24), результат вимірювання дорівнюватиме $W_{r_1} = 20\%$. Якщо радіус часток досліджуваного сипкого матеріалу збільшиться до 2,5 мм, результат вимірювання зміниться так [21]:

$$W_{r_2} = \frac{N_{r_2} - N_{r_{1\text{сух}}}}{E} = 19,33\%. \quad (3.26)$$

Відносна похибка разового вимірювання складатиме [5, 8, 21]:

$$\delta_{W_{r_2}} = \frac{W_{r_1} - W_{r_2}}{W_{r_1}} 100\% = 3,35\%. \quad (3.27)$$

3.3 Використання диференційних вимірювальних схем для зменшення додаткових похибок

Одним із класичних способів зменшення додаткових похибок є використання диференційних вимірювальних схем. Для початку дослідимо варіант із двома ідентичними первинними перетворювачами, як на рисунку 3.2. Один заповнюватиметься умовно сухим матеріалом, другий - матеріалом із

вологістю $W = 20 \%$. Оцінимо граничний випадок, коли радіус часток умовно сухого матеріалу дорівнює 2,5 мм, а вологого - 1 мм.

Запишемо статичну характеристику перетворення для ідеального випадку, коли в обох перетворювачах містяться частки матеріалу радіусом 2,5 мм [8, 10]:

$$W'_{r_2} = \frac{N_{r_2}}{N_{r_{2\text{сух}}}} \cdot E,$$

$$E = \frac{W \cdot N_{r_{2\text{сух}}}}{N_{r_2}} = 10,346. \quad (3.28)$$

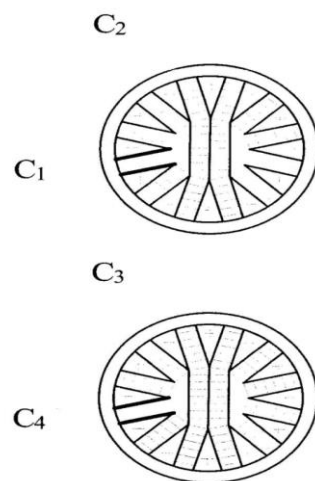


Рисунок 3.2 – Первинні перетворювачі вологості

Для граничного випадку, коли розмір умовно сухих часток піску залишиться 2,5 мм, а вологих зменшиться до 1 мм, результат вимірювання стане таким [8, 10]:

$$W'_{r_1} = \frac{N_{r_1}}{N_{r_{2\text{сух}}}} E = 20,488\%. \quad (3.29)$$

Відносна похибка разового вимірювання складатиме [8, 10]:

$$\delta'_{W_{r_2}} = \frac{W'_{r_1} - W'_{r_2}}{W'_{r_1}} 100\% = 2,38\% . \quad (3.30)$$

Досліджуємо, як вести в даній ситуації диференційний первинний вимірювальний перетворювач.

Цей перетворювач також містить дві ідентичних частини, причому кожна з цих двох частин конструктивно розділена ще на дві частини.

Статична характеристика перетворення для цього випадку виглядатиме так: $W = E((C_3 - C_4)/(C_2 - C_1))$. Необхідно обчислити значення ємностей C_1, C_2, C_3, C_4 . Припустимо, що верхній на рисунку 3.2 перетворювач з вимірювальними конденсаторами C_1, C_2 заповнено умовно сухим, а перетворювач з вимірювальними конденсаторами C_3, C_4 - досліджуванним, тобто вологим матеріалом.

Аналогічно з попереднім варіантом обчислимо значення ємностей C_1, C_2, C_3, C_4 для випадків, коли вони заповнені умовно сухим і вологим сипким матеріалом з радіусами часток 1 мм і 2,5 мм.

Для умовно сухого сипкого матеріалу з радіусами часток 1 мм і 2,5 мм [5]:

$$C_1'' = C_1 \cdot \varepsilon_{cmr1сух} = 2,44 \text{ пФ},$$

$$C_2'' = C_2 \cdot \varepsilon_{cmr1сух} = 34,088 \text{ пФ}. \quad (3.31)$$

$$C_1''' = C_1 \cdot \varepsilon_{cmr2сух} = 2,424 \text{ пФ},$$

$$C_2''' = C_2 \cdot \varepsilon_{cmr2сух} = 33,866 \text{ пФ}. \quad (3.32)$$

де C_1'', C_1''' і C_2'', C_2''' - електричні ємності конденсаторів C_1 і C_2 , заповнених умовно сухим матеріалом з радіусами часток 1 мм і 2,5 мм відповідно.

Для вологого сипкого матеріалу з радіусами часток 1 мм і 2,5 мм [5]:

$$C_4'' = C_1 \cdot \varepsilon_{cmr_1} = 4,8 \text{ пФ},$$

$$C_3'' = C_2 \cdot \varepsilon_{cmr_1} = 67,068 \text{ пФ}.$$

$$C_4''' = C_1 \cdot \varepsilon_{cmr_2} = 4,706 \text{ пФ},$$

$$C_3''' = C_2 \cdot \varepsilon_{cmr_2} = 65,739 \text{ пФ}. \quad (3.33)$$

де C_4'', C_4''' і C_3'', C_3''' - електричні ємності конденсаторів C_4 і C_3 , заповнених вологим матеріалом з радіусами часток 1 мм і 2,5 мм відповідно.

Розглянемо ідеальний випадок, коли в обох перетворювачах містяться частки матеріалу радіусом 2,5 мм [5]:

$$W_{r_2}'' = E \left(\frac{C_3''' - C_4''}{C_2''' - C_1''} \right), \quad (3.34)$$

звідки $E = 10,238$.

Для граничного випадку, коли розмір умовно сухих часток піску залишиться 2,5 мм, а вологих зменшиться до 1 мм, результат вимірювання стане таким [5]:

$$W_{r_1}'' = E \left(\frac{C_3'' - C_4''}{C_2'' - C_1''} \right) = 20,275\% . \quad (3.35)$$

Відносна похибка разового вимірювання складатиме [5]:

$$\delta_{W_{r_2}}'' = \frac{W_{r_1}'' - W_{r_2}''}{W_{r_1}''} 100\% = 1,36\% \quad (3.36)$$

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Охорона праці (ОП) - це система правових, соціально економічних, організаційно технічних, санітарно-гігієнічних, лікувально-профілактичних заходів і засобів, спрямованих на збереження здоров'я й працездатність людини в процесі праці.

Розглянемо характеристику небезпечних та шкідливих факторів. Небезпечні та шкідливі фактори, характерні для такого типу робіт, наведено у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 - Перелік небезпечних і шкідливих факторів

Найменування	Джерело	Характер впливу	Нормоване значення
Фізичні 1.Небезпечна напруга в електричному ланцюзі	Живильна електрична мережа	Поразка електричним струмом	$I = 0,6 \text{ мА}$
2. Підвищений потенціал статичної електрики	Діелектрична поверхня індикатора	Поразка електричним струмом	$E = 15 \text{ кВ/м}$
Хімічні 1.Виробничий загальний пил (аерогелі)	Статична електрика	Роздратування слизуватої оболонки носоглотки	$\text{ГДК}=10\text{мг/м}^3$
2 Пайки	Припій ПОС-60 або ПОС-40	Отруєння парами	Олово-50 мг/м^3 Свинець-0,07 мг/м^3
Нервово-психологічні 1.Шум	Прилади	ГДК	65 дБ.
2. Вібрації	Прилади, обладнання		

Мікрокліматичні умови - параметри температури, відносної вологості, в робочій зоні або в зоні обслуговування та на постійних робочих місцях, установлені відповідними нормами.

Об'єм у повітрі робочої зони не повинен перевищувати: озону - $0,1 \text{ мг / м}^3$, оксидів азоту - 5 мг / м^2 , пилу - 4 мг / м^2 .

Приміщення повинні мати природне і штучне освітлення. Природне світло повинне проникати через вікна, зорієнтовані, як правило, на північний схід. Вікна повинні мати регулюючі пристосування для відкривання, а також жалюзі, штори, зовнішні козирки тощо. Повинен бути забезпечений коефіцієнт природної освітленості не нижче 1,5 %.

Штучне освітлення приміщення обладнане системою загального рівномірного освітлення. Рівень освітленості на робочому столі в зоні розміщення документів повинний бути в межах від 300 лк до 500 лк.

У роботі розробляється вимірювальний канал для визначення вологості піску при спорудженні автомобільних доріг, у тому числі для використання в спеціальних лабораторіях.

Характеристика лабораторії:

- приміщення сухе (відносна вологість не більш 30 %)
- по характері навколишнього середовища приміщення ставиться до класу нормальних, тому що в ньому відсутні інші ознаки, властиві приміщенням печенею, курною й з хімічно активним середовищем.
- розмір приміщення 5 м х 6 м х 3 м;
- для живлення встаткування використовується мережа змінного струму з напругою 220 В, частотою 50 Гц.

Технічні характеристики каналу наступні:

- канали живляться від мережі змінного струму напругою $(220 \pm 5) \text{ В}$ частотою $(50 \pm 1) \text{ Гц}$;
- гарантується нормальна робота каналу в діапазоні температур навколишнього середовища й вимірюваного піску та гравію $20 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$, при відносній вологості повітря від 30 % до 80 %;

Канал розробляється з використанням світлодіодів, тому розглядаються питання забезпечення безпечних умов роботи оператора при дослідженнях доріг.

Виробнича санітарія - один з найважливіших засобів охорони праці, що забезпечує санітарно-гігієнічні умови праці, що зберігає здоров'я на виробництві й сприятливій високій продуктивності праці.

Метеорологічні умови на виробництві (мікроклімат) визначають наступні параметри: температура, рухливість повітря, відносна вологість повітря і теплове випромінювання [24].

Оскільки робота оператора ставиться до легких фізичних робіт, але характеризується напруженою розумовою працею, застосовують оптимальний температурний режим вологості, швидкість повітря для даного приміщення та робочої зони наведений в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 - Значення параметрів мікроклімату в робочій зоні

Категорія робіт	Період року	Температура,	Відносна вологість	Швидкість руху повітря
Легка - 1а	Холодний	від 22 °С до 24 °С	від 40% до 60 %	0,1 м/с
Легка - 1а	теплий	від 23 °С до 25 °С	від 40% до 60 %	0,1 м/с

Комплекс необхідних заходів щодо техніки безпеки визначається виходячи з виду вимірювального каналу, його номінальної напруги, умов праці, типу приміщення й доступності електроустаткування.

Пожежна безпека відповідно забезпечується системами запобігання пожежі, пожежного захисту, організаційними заходами.

ВИСНОВКИ

1 Проведено аналіз вимог щодо вимірювань параметрів вологості при контролі якості щебня та піску, порівняльний аналіз методів вимірювання вологості.

2 Розроблена структурна, функціональна, принципова схема вимірювального каналу вологості.

3 Запропонована удосконалена конструкція первинного вимірювального перетворювача для компенсації похибки в наслідок зміни гранулометричного складу піску та щебня.

4 Зроблено розрахунок складових похибки вимірювального каналу вологості, результати розрахунків додаткової похибки від зміни гранулометричного складу для розробленої конструкції первинного вимірювального перетворювача (датчика) вологості щебня та піску показали, що використання такого перетворювача у вимірювальному каналі дозволить підвищити точність результатів вимірювання порівняльно з розробленими раніше конструкціями.

5 Відносна похибка однократного вимірювання не перевищує: 1,36 %.

6 Теоретично доведено здатність первинного перетворювача вологості щебня і піску ефективно компенсувати додаткову похибку від зміни гранулометричного складу досліджуваної речовини.

7 Запропонована конструкція вимірювального каналу вологості дозволить підвищити точність результатів вимірювання порівняльно з розробленими раніше конструкціями.

8 Діапазон вимірювань складає від 5 % до 25 % вологості.

9 Діапазон температур при вимірюванні від 10 °С до 30 °С.

10 Чутливість сенсора для піску становить $0,8 \frac{n\Phi}{\%}$.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Засоби та методи вимірювань неелектричних величин: підручник / Поліщук Є. С. та ін.; за ред. проф. Є. С. Поліщука. Львів, 2008. 618 с.
2. Метрологія та вимірювальна техніка : підручник / Поліщук Є. С. та ін. Львів : Бескид Біт, 2003. 544 с.
3. Лактіонова Т. М. Вологість ґрунту. Енциклопедія Сучасної України: К. : Інститут енциклопедичних досліджень НАН України. 2006. : <https://esu.com.ua/article-27761>
4. Неруйнівний контроль і технічна діагностика: довідниковий посібник в 5 т. / ред. З.Т. Назарчук. Львів, 2001. Т. 5. 2001. 1134 с
5. Заболотний О.А. Оцінювання впливу змінного гранулометричного складу сипкого матеріалу на результат вимірювання вологості. *Метрологія та прилади*. 2010. № 1. С. 25-30.
6. Патон Б. Є., Троїцький В. О., Посипайко Ю. М. Неруйнівний контроль в Україні // Інформ. бюл. Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики. 2003. № 2(18). С. 5 - 9.
7. Чинков В. М. Основи метрології та вимірювальної техніки : підручник. Харків : ХПІ, 2008. 424 с.
8. Дорожовець М. В. Похибка та непевність результату вимірювання – подібність та відмінність. *Вимірювальна техніка та метрологія*. Львів: 2002. № 60. С. 91-97.
9. Білокур І.П. Основи дефектоскопії: підручник. К.: Азімут, 2004. 496 с.
10. Безвесільна О.М. Технологічні вимірювання та прилади. Перетворюючі пристрої приладів та комп'ютеризованих систем: підручник. Житомир: ЖДТУ, 2006. 560 с.
11. Конструкційні та функціональні матеріали / Бабак В.П., Байса Д.Ф., Різак В.М., Філоненко С.Ф. У двох частинах. – К.: Техніка. – Ч.1, 2003.– 344 с.; ч.2, 2004.– 368 с.

12. Фізичне матеріалознавство / Поплавко Ю.М., Переверзева Л.П., Воронов С.О., Якименко Ю.І. К.: НТУУ «КПІ», 2007. – Частина 2. Діелектрики. 392 с.
13. Овчаренко, А. И. Оцінка метрологічних характеристик електромагнітного перетворювача вологості / А.И. Овчаренко, Р.П. Мігущенко // Український метрологічний журнал, 2010 , вип.3.-С. 78-87.
14. Василенко І.І., Широков В.В., Василенко Ю.І. Конструкційні та електротехнічні матеріали: навч. посіб. Львів, 2007. 242 с.
15. Головка Д. Б., Рего К. Г., Скрипнік Ю. О. Основи метрології та вимірювань : навч. посіб. К. : Либідь, 2001. 408 с.
16. ДСТУ 2843-94 Електротехніка. Основні поняття. Терміни та визначення. Чинний від 1995-01-01. Київ : Держспоживстандарт України, 1995.- 65 с.
17. Колесов С.М., Колесов І.С. Електроматеріалознавство. Підручник. – К.: "Дельта", 2008 р. 516 с
18. Молчанов В.І. Вимірювання НВЧ параметрів діелектричних матеріалів методом тонкого діелектричного резонатора / В.І. Молчанов, В.М. Пашков, Д.Д. Татарчук, А.С. Франчук // Electronics and Communications. – 2015.- Vol. 20. – №1(84). – РР. 23–26
19. Трубаров І.В. Багатоелементні антени на циліндричних діелектричних резонаторах і смужкових лініях у випадку їх ортогональної взаємної орієнтації. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування.* 2011. № 47. с. 98 - 105
20. Татарчук Д. Д. Фільтри НВЧ на основі тонких діелектричних резонаторів / Д. Д. Татарчук, В. І. Молчанов, Ю. В. Діденко, А. С. Франчук / Electronics and communications. 2016. - Т. 21, № 6. С. 6-9
21. Осадчук, В.С. Сенсори вологості [Текст]./ В.С. Осадчук. - Вінниця : ВНТУ, 2003. – 208 с.

22. Venkatesh M. S. An overview of dielectric properties measuring techniques /M. S. Venkatesh, G. S. V. Raghavan // Canadian biosystems engineering. –2005. Vol. 47 (7). PP. 15 -30.

23. Bergo P. Dielectric properties and structural features of barium-iron phosphate glasses / P. Bergo, S. T. Reis, W. M. Pontuschka, J. M. Prison, C. C. Motta // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2004. – No. 336. – PP. 159–164

24. Ярова І. А. Охорона праці. Спеціальні розділи. Одеса: Наука і техніка, 2007. 76 с.

ДОДАТОК А
ІЛЮСТРАТИВНИЙ МАТЕРІАЛ ДО ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний автомобільно-дорожній університет
(ХНАДУ)

Механічний факультет

Кафедра метрології та безпеки життєдіяльності

ІЛЮСТРАТИВНИЙ МАТЕРІАЛ ДО ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ
бакалавра

РОЗРОБКА ВИМІРЮВАЛЬНОГО КАНАЛУ ВОЛОГОСТІ ДЛЯ КОНТРОЛЮ
ЯКОСТІ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ

Завідувач кафедри, к. т. н., проф.
Нормоконтролер, к. т. н., доц.
Керівник к. т. н., доц.
Студент гр. ММ 41- 19

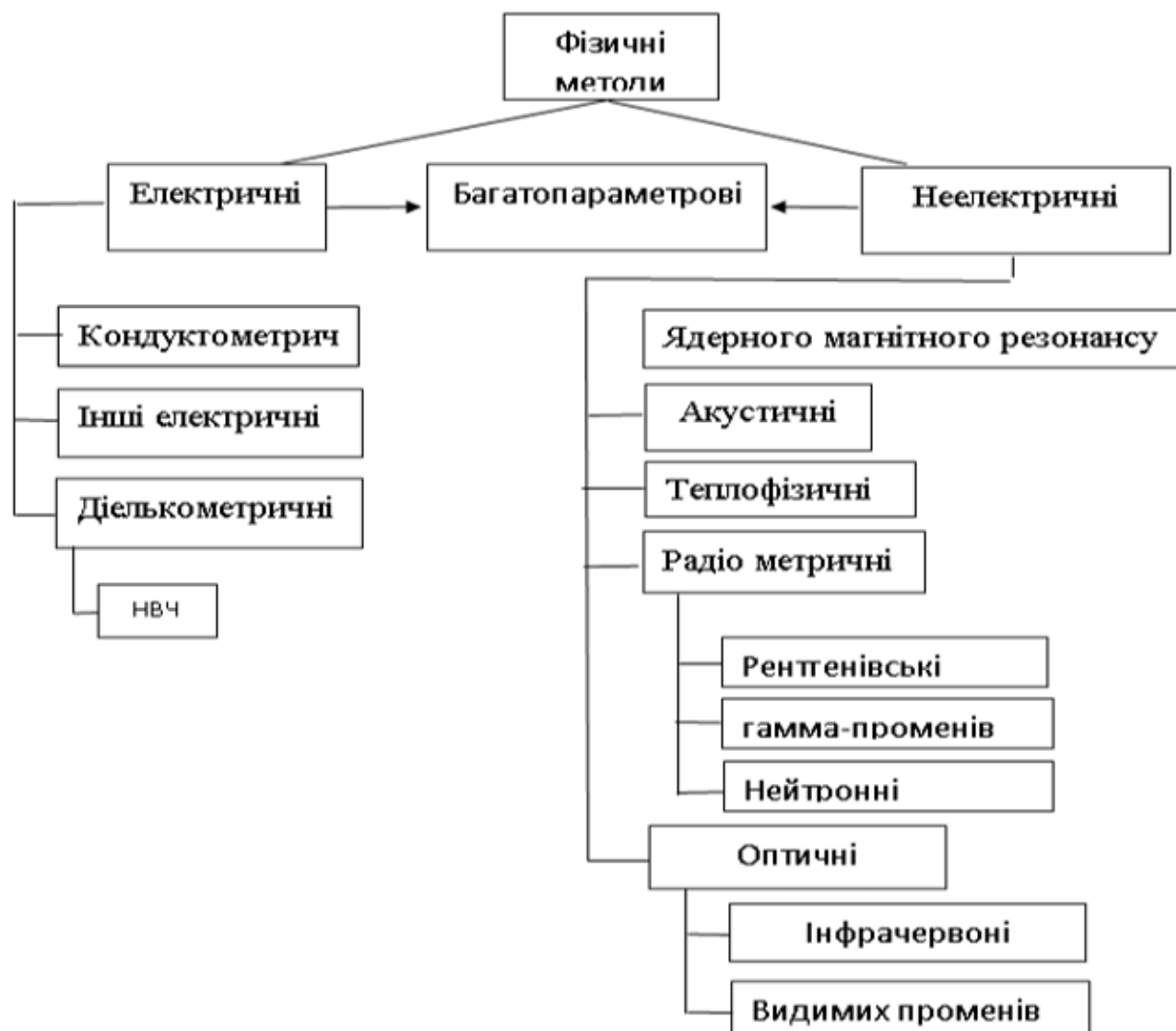
м. Харків - 2023



Богатов О. І.
Москаленко М. В.
Петрукович Д. Є.
Шаншин Є. М.

- Мета роботи – розробка вимірювального каналу вологості для контролю якості сипких матеріалів.
- Об'єкт дослідження – вимірювальний канал вологості сипких матеріалів та первинний вимірювальний перетворювач
- Метод дослідження – визначення похибки вимірювальних каналів вологості щебня та піску.

МЕТОДИ ВИМІРЮВАНЬ ВОЛОГОСТІ

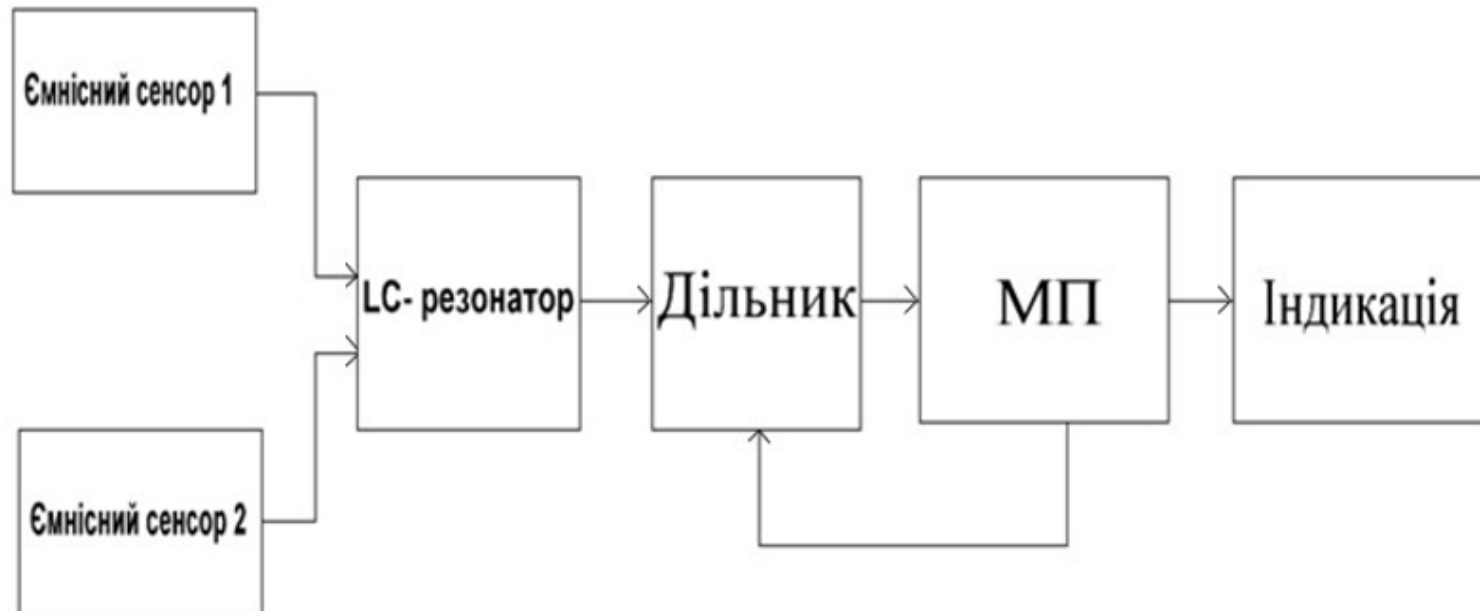


ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ

Критерії Методи	Час вимірювання	Абсолютна похибка	Простота конструкції	Σ
прямі	1	5	2	8
теплофізичні	3	2	3	8
кондуктометричні та інші неелектричні	4	3	3	10
ЯМР	5	4	2	11
електричні	5	3	2	10
діелькометричні	5	5	4	14
інші електричні	5	3	2	10

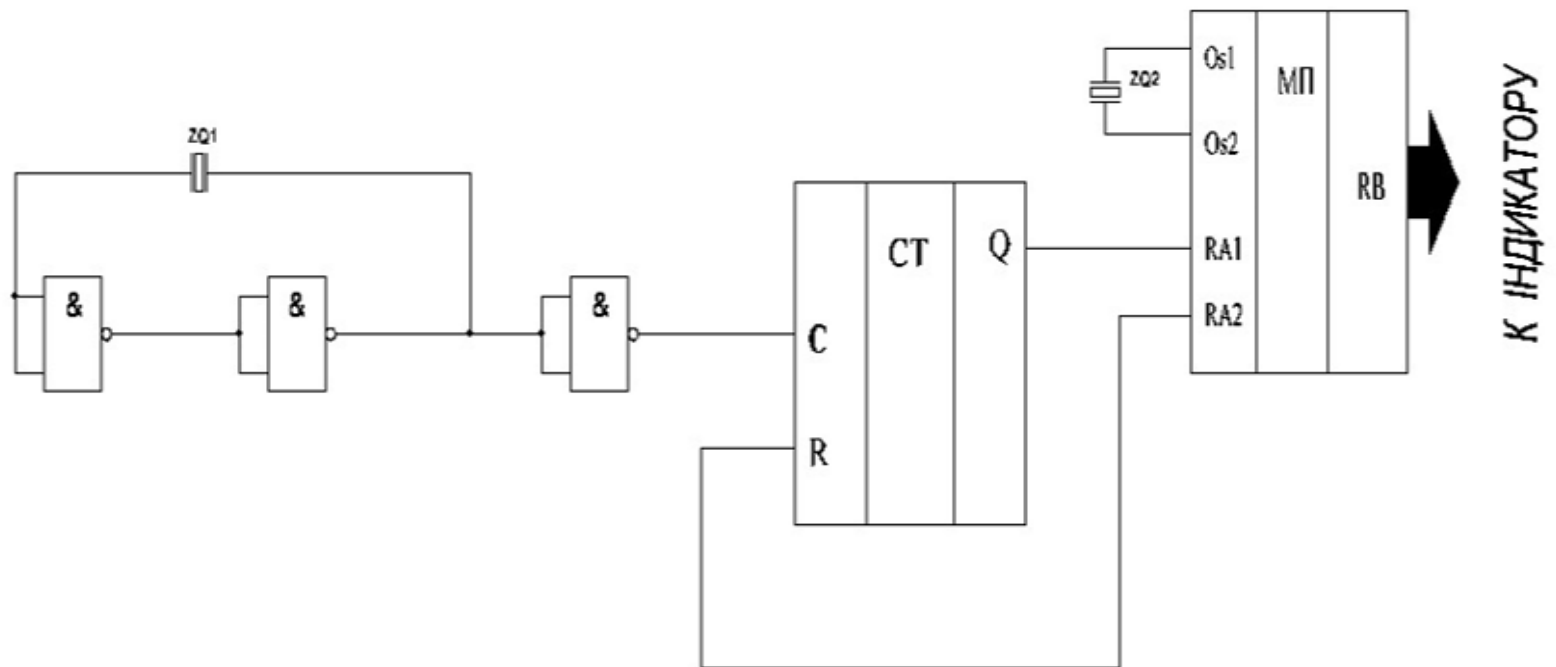
Підсумкова колонка таблиці показує, що самим найкращім є діелькометричний метод

СТРУКТУРНА СХЕМА ВИМІРЮВАЛЬНОГО КАНАЛУ ВОЛОГОСТІ ПІСКУ (ЩЕБНЯ)



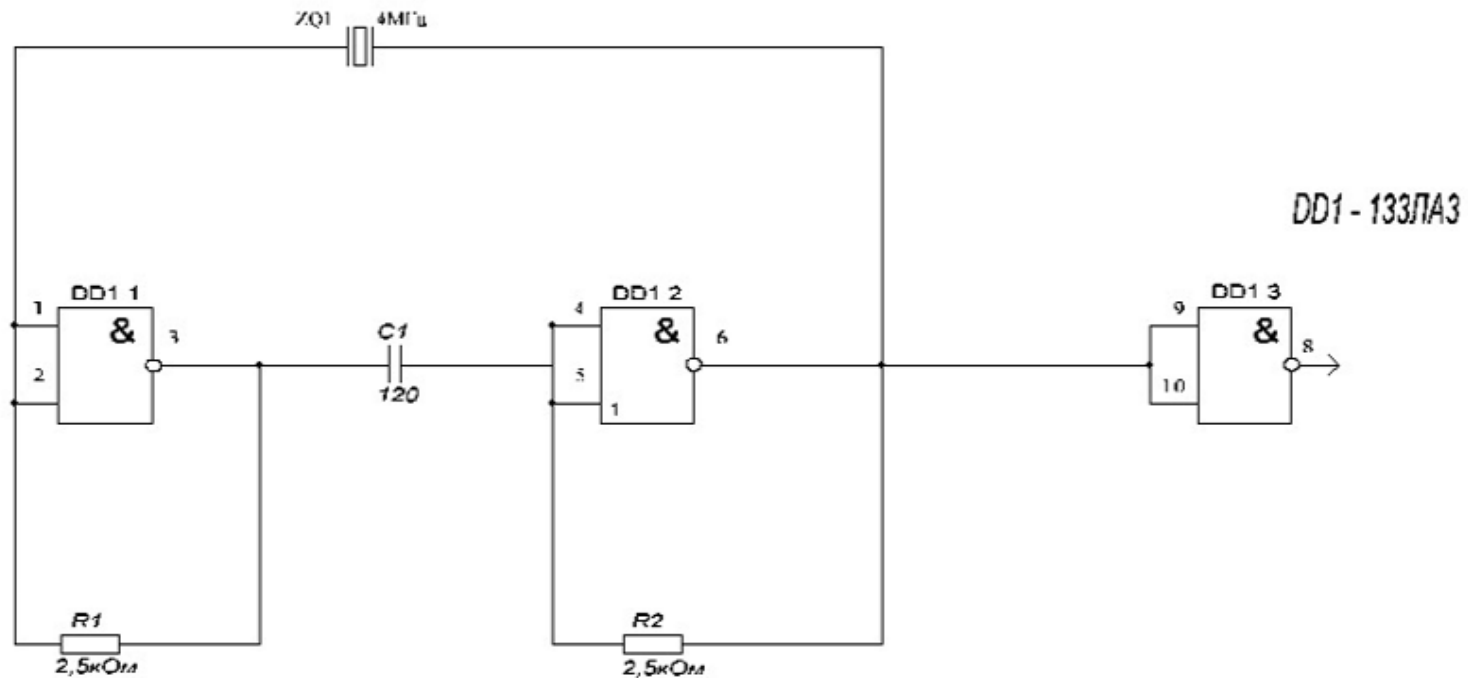
Встановлюємо 2 вологочутливих ємнісних сенсора. Аналізуємо зміну частоти LC резонатора, Так як частота пропорційна кількості імпульсів за певний час, то при зміні частоти LC резонатора підрахунку певної кількості імпульсів, отримуємо різний час їх рахунки. Тому встановимо програмований дільник для накопичення імпульсів. Дільник буде управлятися мікропроцесором. За різницею опорного і фактичного часу накопичення можна говорити про певний рівень вологості в тому чи іншому середовищі.

ФУНКЦІОНАЛЬНА СХЕМА ВИМІРЮВАЛЬНОГО КАНАЛУ ВОЛОГОСТІ ПІСКУ (ЩЕБНЯ)



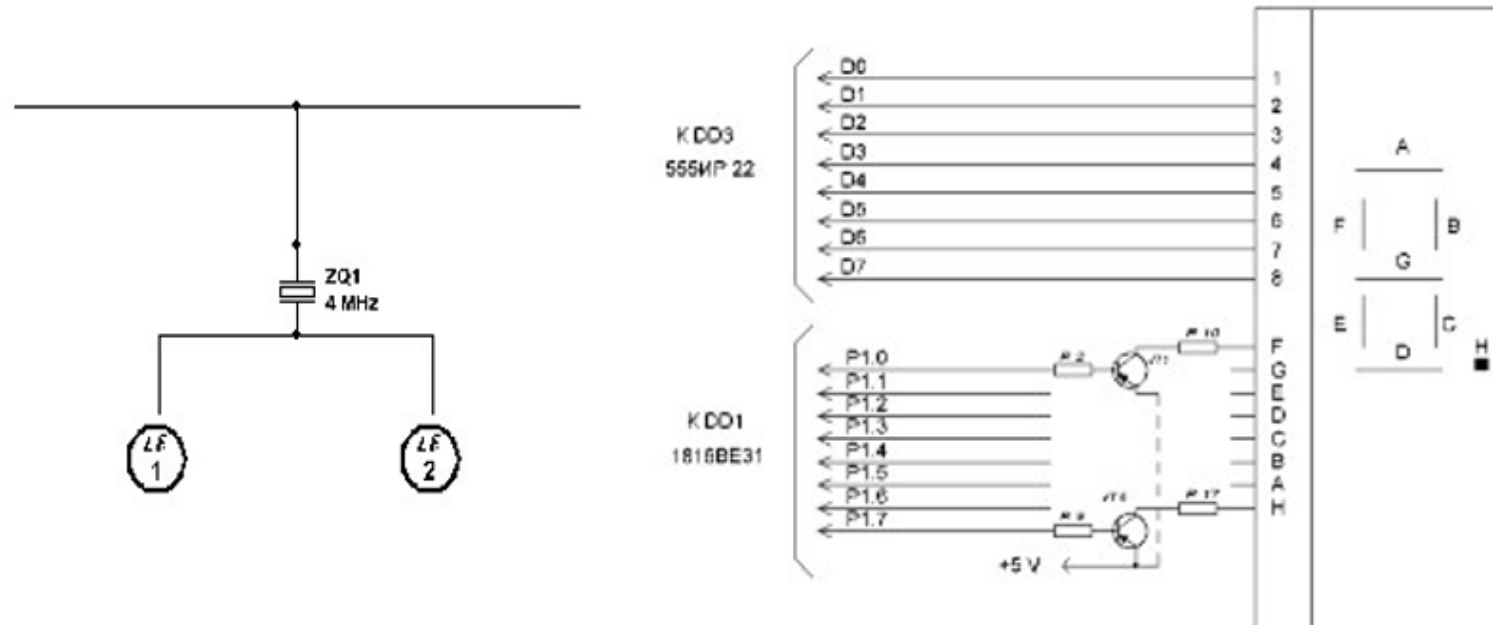
LC резонатор РК17С на 4 МГц; С1 – конденсатор 120 пФ; Дільник - мікросхема 555ПЦ1;
мікропроцесор - РІС контролер - 16С84

ПРИНЦИПОВА ЕЛЕКТРИЧНА СХЕМА ВИМІРЮВАЛЬНОГО КАНАЛУ ВОЛОГОСТІ ПІСКУ (ЩЕБНЯ)



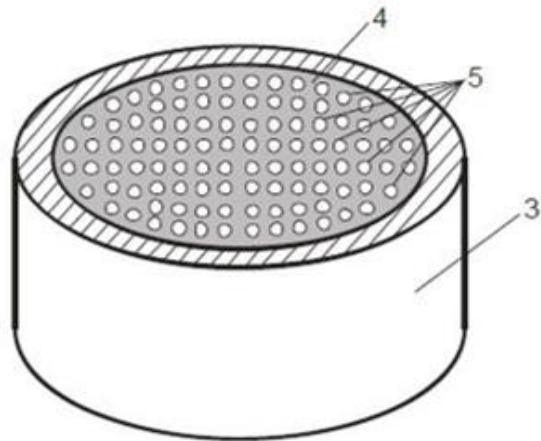
LC резонатор РК17С на 4 МГц; С1 – конденсатор 120 пФ; R1, R2 - резистор 0,125 – 2,5кОм $\pm 10\%$; DD1.1,DD1.2,DD1.3 - ІС 133ЛА3.

СХЕМА ПІДКЛЮЧЕННЯ ІНДИКАТОРА



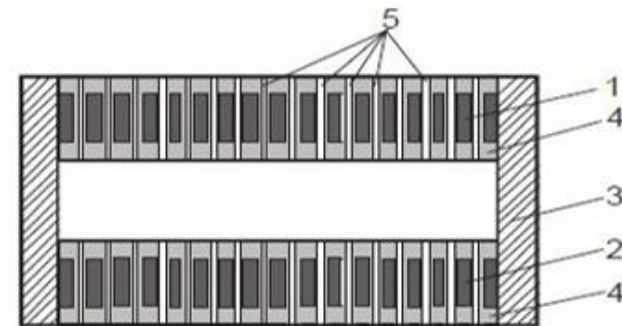
На схемі показано підключення світлодіодного індикатора з загальним катодом. Необхідність встановлення діода, показаного пунктиром визначається експериментально. Він забезпечує замикання транзисторів і виключає підсвічування непотрібних сегментів. Рекомендований тип - КД105 або будь який кремнієвий з струмом не менше 300 мА. Транзистори VT1, VT8 на схемі типу КТ209 або інші кремнієві зі струмом 300 мА. R10, R17 підбирають під конкретний тип індикатора в межах 50 Ом - 1к для досягнення оптимальної яскравості світіння сегментів.

БАЗОВА КОНСТРУКЦІЯ ЄМНІСНОГО ПЕРВИННОГО ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ВОЛОГОСТІ



Загальний вигляд

- де 1,2 - електроди;
- 3 – діелектрична труба;
- 4 – шар полімеру;
- 5 – отвори для руху досліджуваного матеріалу;



Поперечний переріз

- Діелектрична труба d (зовнішній) = 50 мм;
- Відстань між електродами $l = 1,5$ мм

Під час руху потоку піску через діелектричну трубу, в якій міститься вологочутливий ємнісний сенсор для вимірювання вологості, пісок через отвори 5 заповнює простір між електродами 1 і 2, які вкриті шаром полімеру 4 і жорстко закріплені в діелектричній трубі 3. Це викликає зміну діелектричної проникності ємнісного сенсора вологості. Залежно від зміни вологості вимірювального піску змінюється її діелектрична проникність, отже, змінюється і ємність сенсора вологості.

ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛОГОЧУТЛИВОГО ЄМНІСНОГО СЕНСОРУ

Для знаходження загальної діелектричної проникності $\varepsilon_{заг}$ враховують діелектричну проникність гетерогенної суміші води та піску ε_c та діелектричну проникність полімеру ε_n .

Для оцінювання ε_c запропоновано емпіричне рівняння Бруггемана:

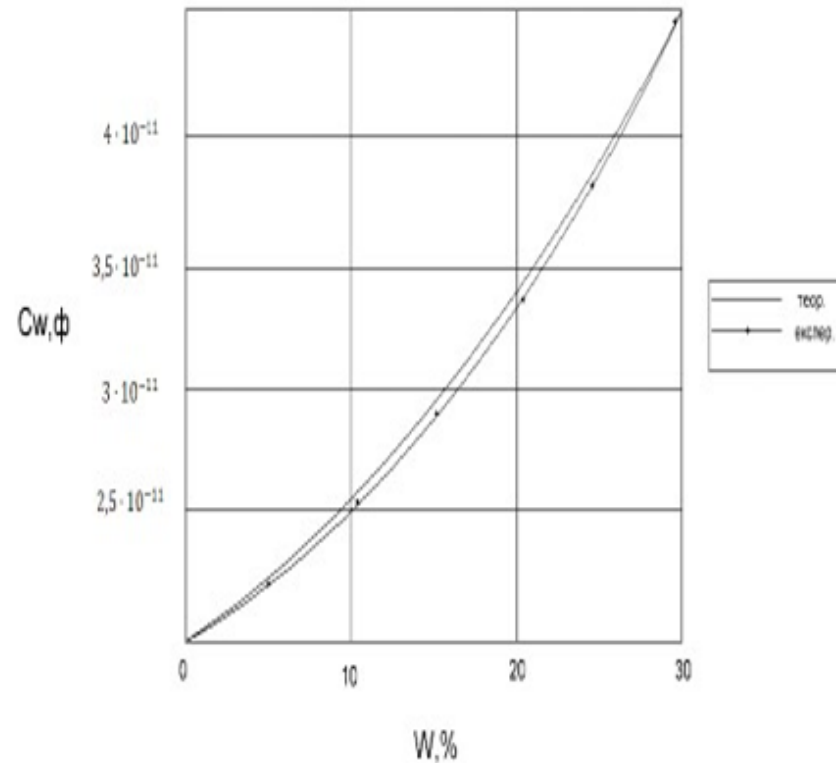
$$\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_c}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} = (1 - \alpha) \sqrt[3]{\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_2}} \quad (1)$$

де ε_1 – діелектрична проникність води;
 ε_2 – діелектрична проникність піску;
 α – об'ємна концентрація води.

Загальна діелектрична проникності сенсора $\varepsilon_{заг}$ визначається з емпіричного рівняння Ліхтенекера як діелектрична проникність двошарової структури, у якій першим шаром є полімер, а другим - гетерогенна суміш води та піску:

$$\varepsilon_{заг} = \frac{\varepsilon_n \varepsilon_c}{\beta_1 \varepsilon_c + \beta_2 \varepsilon_n} \quad (2)$$

де β_1 – об'ємна концентрація шару полімеру між електродами;
 β_2 – об'ємна концентрація гетерогенної суміші води та піску.



Експериментальна та теоретична залежності зміни ємності від вологості піску (щебня)

Для розрахунку ємності вологочутливого сенсора з сіткоподібними електродами скористаємось формулою:

$$C = \frac{\varepsilon_{заг} \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d} \quad (3)$$

З урахуванням активної площі електродів S , а також усіх виразів рівність (3) матиме вигляд:

$$C = \frac{\varepsilon_n \varepsilon_c \varepsilon_0 (\pi R^2 - p \pi R_0^2)}{d(\beta_1 \varepsilon_c + \beta_2 \varepsilon_n)} \quad (4)$$

де ε_0 – діелектрична проникність вакууму, Ф/м;

R_0 – радіус отвору м;

p – кількість отворів у електроді

РОЗРАХУНОК СКЛАДОВИХ ПОХИБКИ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ ВОЛОГОСТІ

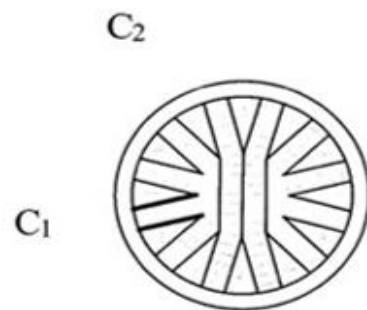
Ємність одинарного первинного перетворювача визначають як:

$$C = C_{01} + C_{02} + C_{03} \quad (5)$$

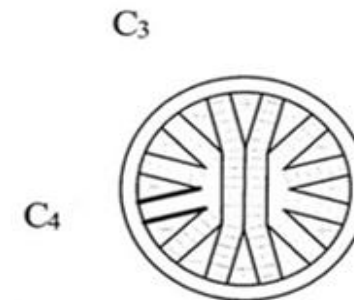
$$C_{01} = \varepsilon_0 \varepsilon \left[g_{01} + 2(g_{21} + g_{41} + g_{61} + g_{81} + 2g_{101} + 2g_{121}) \right] \cdot 12 \quad (6)$$

$$C_{02} = \varepsilon_0 \varepsilon \left[g_{02} + 2(g_{22} + g_{42} + g_{62} + g_{82} + 2g_{102} + 2g_{122}) \right] \cdot 2 \quad (7)$$

$$C_{03} = \varepsilon_0 \varepsilon \left[2 \left(0,52l + \frac{2l}{\pi} \ln \left(\frac{2m}{Z} + 1 \right) \right) \right] \quad (8)$$



Перетворювач з вимірювальними конденсаторами C₁, C₂ - заповнено умовно сухим матеріалом



Перетворювач з вимірювальними конденсаторами C₃, C₄ - заповнено вологим матеріалом.

Таблиця 1 - Результати розрахунку просторових характеристик ємності C_{01}

Просторова характеристика	Розрахункова формула	Результат, м
g_{01}	$L \cdot l / Z$	0,0925
g_{21}	$0,26l$	0,0130
g_{41}	$0,26L$	0,0096
g_{61}	$\frac{l}{\pi} \ln\left(\frac{2m}{Z} + 1\right)$	0,0015
g_{81}	$\frac{l}{\pi} \ln\left(\frac{2m}{Z} + 1\right)$	0,0011
g_{101}	$0,077Z$	0,00154
g_{121}	$m/4$	0,00025

Таблиця 2 - Результати розрахунку просторових характеристик ємності C_{02}

Просторова характеристика	Розрахункова формула	Результат, м
g_{02}	$d_1 \cdot l / Z$	0,1673
g_{22}	$0,26l$	0,0130
g_{42}	$0,26d_1$	0,0170
g_{62}	$\frac{l}{\pi} \ln\left(\frac{2m}{Z} + 1\right)$	0,0015

ВИСНОВКИ

1 Проведено аналіз вимог щодо вимірювань параметрів вологості при контролі якості щебня та піску, порівняльний аналіз методів вимірювання вологості

2 Розроблена структурна функціональна, принципова схема вимірювального каналу вологості

3 Запропонована удосконалена конструкція первинного вимірювального перетворювача (сенсора) для компенсації похибки в наслідок зміни гранулометричного складу піску та щебня.

4 Зроблено розрахунок складових похибки вимірювального каналу вологості, результати розрахунків додаткової похибки від зміни гранулометричного складу для розробленої конструкції первинного вимірювального перетворювача (сенсора) вологості щебня та піску показали, що використання такого перетворювача у вимірювальному каналі дозволить підвищити точність результатів вимірювання порівняльно з розробленими раніше конструкціями

5 Відносна похибка разового вимірювання не перевищує: 1,36 %

6 Теоретично доведено здатність первинного перетворювача (сенсора) вологості щебня і піску ефективно компенсувати додаткову похибку від зміни гранулометричного складу досліджуваної речовини

7 Запропонована конструкція вимірювального каналу вологості дозволить підвищити точність результатів вимірювання порівняльно з розробленими раніше конструкціями

8 Діапазон вимірювань складає від 5 % до 25 % вологості

9 Діапазон температур при вимірюванні від 10 °С до 30 °С

10 Чутливість сенсора для піску (щебня) становить близько 0,8 пФ/%