МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Чорноморський національний університет імені Петра Могили

Факультет комп'ютерних наук

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

ДОПУЩЕНО ДО ЗАХИСТУ
В. о. завідувача кафедри АКІТ,
кандидат технічних наук, доцент

_____ М. І. Сідєлєв

"____" _____ 2023 р.

МАГІСТЕРСЬКА НАУКОВА РОБОТА

на тему: **«Підвищення ефективності АСК переробної промисловості шляхом удосконалення контрольно-вимірювальних систем сипких матеріалів»**

Пояснювальна записка

Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

151 – МНР – 671.21717113

Студент _____ Руденко Д.Г.

Керівник _____ Трунов О.М.

Консультант _____ Григор'єва Л.І.
(дата)

Миколаїв – 2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Чорноморський національний університет ім. Петра Могили
(повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут, факультет, відділення: Комп`ютерних наук
Кафедра, циклова комісія: Автоматизація та КІТ
Освітньо-кваліфікаційний рівень: рівень вищої освіти другий (магістр)

Напрям підготовки 151 «Автоматизація та приладобудування»
(шифр і назва)
Спеціальність 151 «Автоматизація та комп`ютерно-інтегровані технології»
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
В.о.завідувача кафедри, голова циклової комісії

Сідєлєв М. І. _____
"____"_____2022 р

З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ НАУКОВУ РОБОТУ

Руденко Дмитро Григорович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи)
«Підвищення ефективності АСК переробної промисловості шляхом удосконалення контрольно-вимірювальних систем сипких матеріалів»

Керівник проекту (роботи) доктор технічних наук, професор
Трунов Олександр Миколайович
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом вищого навчального закладу від "___"_____2022 р. №__
2. Строк подання студентом проекту (роботи) 14.06.2023

3. Вихідні дані до проекту (роботи): загальна проблема підвищення ефективності за рахунок зменшення трудомісткості та собівартості, що досягається впровадженням інноваційних рішень при модернізації сучасних виробничих підприємств є однією із актуальних задач. Одним із шляхів удосконалення автоматизованих систем керування (АСК) підприємств переробної промисловості є удосконалення контрольно-вимірювальних систем сипких матеріалів за допомогою інноваційних розробок.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): провести пошук існуючих контрольно-вимірювальних АСК сипких матеріалів, виявити потребу у найбільш прогресивних рішеннях в Україні і світі. Розглянути основи процесу автоматизації і формування архітектури контрольно-вимірювальних АСК, як багаторівневу, провести

порівняння і обґрунтування її компонентів, продемонструвати придатність до інтеграції до SCADA-систем. Запропонувати рішення датчика граничного рівня, побудувати його модель та провести модельне та експериментальне моделювання. На підставі компютерного та експериментального моделювання сформувати наукове обгрунтування про границі застосовності пропонованого рішення контрольно-вимірювальних АСК для преробної промисловості та суміжних галузей виробництв.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):
   1. Функціональна блок-схема системи керування комплексом;
   2. Приклад контрольно-вимірювальних АСК переробної промисловості;
   4. Функціональна блок-схема датчика рівня;
   5. Електрична принципова схема системи керування комплексом;
   6. Користувацький інтерфейс системи управління комплексом.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Трунов О.М. д-р техн. наук, проф.	13.10.2022	
2	Трунов О.М. д-р техн. наук, проф.	03.01.2023	
3	Трунов О.М. д-р техн. наук, проф.	03.04.2023	
4	Григор'єва Л.І., професор кафедри екології	19.04. 2023	

7. Дата видачі завдання «17» жовтня 2022 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Затвердження пропозицій теми від керівника	20.09.2022	
2	Обговорення із студентом затвердженої теми	01.10.2022	
3	Формування завдання	15.10.2022	
4	Визначення актуальності, об’єкту, предмету	01.11.2022	
5	Пошук літератури, патентний пошук, уточнення задач дослідження	15.11.2022	
6	Виконання першої частини	01.12.2022	
7	Аналіз керівником записки першої частини (ЕВ*), формування зауважень та пропозицій	29.12.2022	
8	Опрацювання другої частини	01.03.2023	
9	Робота над третьою частиною	01.04.2023	
10	Робота над розділом з охорони праці	19.04.2023	
11	Передзахисти	19.05.2023	
12	Передача (ДВ) кваліфікаційної роботи	14.06.2023	

*ЕВ – електронний варіант, ДВ – друкований варіант.

Студент _____ Руденко Д.Г
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи)

_____ Трунов О.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Руденко Д.Г. Підвищення ефективності АСК переробної промисловості шляхом удосконалення контрольно-вимірювальних систем сипких матеріалів.

Магістерська робота на здобуття освітньої кваліфікації магістра з автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій. – Чорноморський національний університет імені Петра Могили, Миколаїв, 2023.

Дана магістерська дипломна робота присвячена підвищенню ефективності АСК переробної промисловості шляхом застосування інноваційних вимірювальних систем, що використовують вібраційні датчики.

Об’єктом дослідження виступає автоматизація процесів виміру рівня сипких матеріалів однорідної структури та сумішей.

Предметом дослідження є методи, моделі, які дозволять підвищити точність спрацьовування датчика граничного рівня та дослідити його роботу за різних умов використання у АСК переробної промисловості.

Основна частина складається з наступних розділів: стан, тенденції та розвиток автоматизованих систем переробної промисловості; структурні, конструкторські та схемотехнічні і алгоритмічні рішення, моделі та методи, що реалізовуватимуть АСК; конструкторські та схемотехнічні і алгоритмічні рішення, моделі та методи, що реалізовуватимуть роботу вібраційного датчика граничного рівня в АСК переробної промисловості різних галузей.

В спеціальній частині дипломної роботи з «Охорони праці та безпеки у надзвичайних ситуаціях на підприємствах зберігання та переробки зерна» розглянуто умови праці та заходи щодо цивільного захисту під час надзвичайної ситуації на підприємствах зберігання та переробки зерна. Результатом дослідження є інтегральна оцінка стану умов праці в приміщенні, рекомендації щодо поліпшення умов праці та заходи мінімізації наслідків НС.

Магістерська робота складається із анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 51 найменувань. Загальна кількість сторінок – 114, таблиць - 9, рисунків – 48, додатків - 4.

ABSTRACT

Rudenko D.G. Improving the efficiency of the ACS in the processing industry through the enhancement of bulk material control and measurement system.

Master's thesis for obtaining a master's degree in automation and computer-integrated technologies. – Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, 2023.

This master's thesis is devoted to improving the efficiency of ACS of the processing industry through the use of innovative measurement systems that use vibration sensors.

The object of the study is the automation of level measurement processes of bulk materials of homogeneous structure and mixtures.

The subject of the study are methods, models to improve the accuracy of operation of the level limit sensor and to study its operation under various conditions of use in the ACS of the processing industry.

The main part consists of the next sections: the state, trends and development of automated systems of processing industry; structural, design and schematic and algorithmic solutions, models and methods implemented by ACS; design and schematic and algorithmic solutions, models and methods that implement the work of the vibrating level sensor in ACS of processing industry of different industries.

The special part of the thesis on "Labor protection and safety in emergency situations at grain storage and processing enterprises" considers working conditions and civil protection measures during an emergency situation at grain storage and processing enterprises. The result of the study is an integral assessment of working conditions in the premises, recommendations for improving working conditions and measures for minimizing the consequences of emergencies.

The master's work consists of an abstract, an introduction, four chapters, a conclusion, a list of 51 references. The total number of pages - 114, tables - 9, figures - 48, applications - 4.

ЗМІСТ

ВСТУП 9

РОЗДІЛ І. СТАН, ТЕНДЕНЦІЇ ТА РОЗВИТОК АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ ПЕРЕРОБНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ 11

1.1 Стан та тенденції розвитку автоматизованих систем керування для зберігання та утворення сумішей різного призначення у переробній промисловості України 11

1.2 Аналіз конструктивних, схемотехнічних та організаційних рішень існуючих аналогів автоматизованих систем керування для багатокомпонентних сумішей в умовах виробничих підприємств 14

1.2.1 Опис об'єкту управління АСК 14

1.2.2 Опис складових частин контрольно-вимірювальних систем для автоматизації процесів переробної промисловості 15

1.3. Обґрунтованість використання вібраційного датчика камертонного виконання, аналіз патентів 22

1.3.1 Використання датчика вібраційного типу в переробній промисловості України 22

1.3.2 Аналіз патентної інформації 23

1.4 Завдання на проектування 30

1.5 Висновки до розділу І 31

РОЗДІЛ ІІ. СТРУКТУРНІ, КОСТРУКТОРСЬКІ ТА СХЕМОТЕХНІЧНІ І АЛГОРИТМІЧНІ РІШЕННЯ, МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ, ЩО РЕАЛІЗОВУВАТИМУТЬ АСК 32

2.1 Узагальнена структура АСК виготовлення сумішей в умовах виробничих підприємств 32

2.2 Функціональна схема АСК та блок-схема алгоритму управління конвеєрною лінією 35

2.3 Проектування, вибір і опис блоків для автоматизованої системи в умовах виробничих підприємств на прикладі зерносховища та бетонного виробництва. 39

2.3.1 Опис конструкції вібраційного датчика 39

2.3.2 Основні дані та технічні характеристики Датчика 43

2.3.3 Порядок монтажу Датчика 44

2.3.4 Порядок підключення Датчика 45

2.3.5. Функціональна схема камертонного сигналізатора рівня 47

2.4. Вибір та аналіз блоків для автоматизованої системи керування 48
2.5 Висновки до розділу II..... 56
РОЗДІЛ III. КОСТРУКТОРСЬКІ ТА СХЕМОТЕХНІЧНІ І АЛГОРИТМІЧНІ РІШЕННЯ, МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ, ЩО РЕЛІЗОВУВАТИМУТЬ РОБОТУ ВІБРАЦІЙНОГО ДАТЧИКА ГРАНИЧНОГО РІВНЯ В АСК ПЕРЕРОБНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ РІЗНИХ ГАЛУЗЕЙ..... 57
3.1 Загальна архітектура та електрична принципова схема 57
3.2 Опис та обґрунтування компонентів електронного блоку сигналізатора рівня..... 59
3.2 Моделювання роботи п'єзокерамічного резонатора 68
3.3 Знаходження власної частоти вібрації вилки..... 71
3.4 Вплив конструкції камертону на точність виміру..... 73
3.5 Модальний аналіз резонансу камертона..... 77
3.6 Моделювання впливу в'язкості рідини на резонансну частоту камертона 79
3.7 Моделювання резонансної частоти камертона в рідині з різною щільністю. 83
3.8 Висновки до розділу III 85
РОЗДІЛ IV. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ НА ПІДПРИЄМСТВАХ ЗБЕРІГАННЯ ТА ПЕРЕРОБКИ ЗЕРНА..... 87
4.1 Опис підприємства зберігання та переробки зерна, робочих місць, обладнання та складання вихідних даних для кількісної оцінки умов праці..... 87
4.2 Безпека у надзвичайних ситуаціях на об'єктах зернової промисловості 99
4.3 Висновки до розділу IV 102
ВИСНОВКИ..... 103
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... 105
ДОДАТОК А..... 110
ДОДАТОК Б 111
ДОДАТОК В..... 112
ДОДАТОК Г 113

ВСТУП

Зменшення загальної трудомісткості та собівартості за рахунок впровадження автоматизації є однією із актуальних задач модернізації сучасних виробничих підприємств. Задача автоматизації та роботизації технологічних процесів як інструмент збільшення продуктивності стає першочерговою. Її розв’язок потребує підвищення ефективності у тому числі і для переробної промисловості. Одним із шляхів забезпечення ефективної роботи автоматизованих систем керування (АСК) таких технологічних процесів є удосконалення контрольно-вимірювальних систем сипких матеріалів за допомогою інноваційних розробок вібраційного датчика рівня сипких речовин.

Вібраційні датчики рівня, що придатні виконувати роль сигналізаторів граничного рівня є важливим елементом автоматизації технологічних процесів у різних виробничих і не виробних галузях господарств. Вони є невід’ємною частиною систем контролю рівня сипких матеріалів (нерідко й у рідинах) у ємностях, оскільки такі системи запобігають переповненню або спустошенню, що може призвести до аварій та втрати продукції.

У сучасному виробництві датчики та сигналізатори рівня використовуються для автоматичного керування технологічними процесами, підвищення ефективності виробництва та зниження витрат на персонал, що виконував такі функції у ручну. У зв'язку з цим питання вибору та оптимального застосування датчика або сигналізатора рівня стає актуальним і потребує глибокого вивчення. Вібраційні датчики та сигналізатори рівня є одними із найпоширеніших типів датчиків, що застосовуються в різних галузях промисловості для контролю рівня сипких матеріалів. Вони засновані на принципі зміни частоти або амплітуди вібрації резонатора при дотику до контрольованого матеріалу, що дозволяє визначити його наявність або відсутність на певному рівні.

Вібраційні датчики граничного рівня мають ряд переваг перед іншими типами датчиків, такі як: висока точність вимірювань, висока надійність і

довговічність, можливість використання в широкому діапазоні температур та умов експлуатації, а також простота монтажу та обслуговування.

Метою роботи є підвищення ефективності АСК переробної промисловості шляхом застосування іноваційних вимірювальних систем, що використовують вібраційні датчики та сигналізатори рівня.

Об’єктом роботи є автоматизація процесів виміру рівня сипких матеріалів однорідної структури та сумішей.

Предметом дослідження є методи, моделі, які дозволять підвищити точність спрацьовування датчика граничного рівня та дослідити його роботу за різних умов використання у АСК переробної промисловості.

Для досягнення мети поставлено наступні задачі:

— вивчення механізмів дії вібраційних датчиків;

— аналіз різниці між вібраційними датчиками: їх конструкції, чутливості і точності вимірювань;

— розробка методики тестування вібраційних датчиків, включаючи розробку та проведення експериментів для оцінки точності та надійності вимірювань, а також дослідження впливу різних факторів на роботу датчиків;

— дослідження можливості застосування вібраційних сигналізатори рівня у різних галузях у системах АСК;

— дослідження проблем та обмежень вібраційних датчиків.

РОЗДІЛ І. СТАН, ТЕНДЕНЦІЇ ТА РОЗВИТОК АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ ПЕРЕРОБНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

1.1 Стан та тенденції розвитку автоматизованих систем керування для зберігання та утворення сумішей різного призначення у переробній промисловості України

У країнах, що мають розвинену промисловість, наприклад США, країни ЄС та Близького Сходу, держава відіграє визначальну роль у її розвитку. Основна увага приділяється стимулюванню переробної промисловості, підвищенню обсягів експорту продукції з високою доданою вартістю, а не сировини.

Нині в українському експорті висока частка товарів із низькою доданою вартістю. Грубо кажучи, 2/3 українського експорту – це сировина. Але що більше ступінь переробки сировини всередині країни, то швидше зростатиме економіка. І тим менше залежатиме курс гривні від коливань світових цін на металопродукцію та продукцію агропромислового комплексу. У той же час, понад половину імпорту в Україну складає готова продукція. Це дуже погане співвідношення.

Для більш точної оцінки поточної ситуації щодо розвитку переробної промисловості, слід виділити кілька значимих прикладів переробної промисловості України та цілей, які будуть досягнуті у процесі вдосконалення цієї галузі.

Говорячи про переробну промисловість України, на перше місце слід віднести агропромисловий комплекс. Переробка зернових є однією із найважливіших галузей харчової промисловості України. Згідно з даними Державної служби статистики України, 2020 року Україна виробила 29,4 мільйона тонн зерна, з яких понад 16 мільйонів тонн було експортовано. Однак значна частина виробленого зерна переробляється на території країни.

Найбільш поширені види переробки зернових в Україні включають:

- Виробництво борошна: борошно є одним з основних продуктів переробки

зерна в Україні. Існує велика кількість млинів, що виготовляють борошно різної якості та з різним ступенем очищення.

- Виробництво крупи: в Україні виробляються та упаковується різні види круп, у тому числі гречана, пшенична, ячна, геркулесова та інші.
- Виробництво комбікормів: зерно використовується для виробництва комбікормів для тварин, таких як свині, кури, корови та інші.
- Виробництво етилового спирту: зерно використовується як сировина для виробництва етилового спирту, який використовується у виробництві різних видів алкогольної продукції.

Важливо відзначити, що переробка зернових є великим джерелом експортних доходів для України. Однак для розвитку даної галузі необхідно вдосконалювати технології та впроваджувати сучасні системи автоматизації виробництва, щоб підвищити ефективність та конкурентоспроможність українських підприємств.

Щодо розвитку АСК переробної зернової промисловості та систем управління зерносховищами, промисловість України досягла значного просування за рахунок великої потреби цих видів виробницт, тим самим підштовхуючи інновації устаткування для автоматизації процесів, поступово замінюючи пропозиції іноземних виробників.

Також, з агропромисловим комплексом України тісно пов'язане виробництво добрив. Основними видами добрив, що виробляються в Україні, є азотні, фосфатні та калійні добрива. Вони широко використовуються в сільському господарстві для підвищення родючості ґрунтів та збільшення врожайності. Крім того, виробляються мікродобрива, які використовуються для корекції поживних речовин у грунті.

Україна є важливим експортером добрив у світі. Головними споживачами українських добрив є країни ЄС, Туреччина, Бразилія, Індія та інші. Експорт добрив із України становить значну частину експорту країни. Однак переробна промисловість добрив стикається з деякими викликами.

Останніми роками характерною рисою українського ринку добрив є парадоксальність. З одного боку, агросектор — одна з небагатьох сфер української економіки, яка динамічно розвивається, тож ємність ринку мінеральних добрив поступово зростає. З іншого боку — обсяги виробництва добрив в Україні поступово знижуються, а ціни внутрішнього ринку стають вищими за ціни на зовнішньому ринку. Переробна промисловість пов'язана з виробництвом добрив значною мірою відстає від потужностей зарубіжних виробництв і потребує розвитку АСК для зменшення витрат на виробництво та збільшення обсягу продукції.

Ще одним перспективним напрямом переробної промисловості України є виробництво бетону. Стан виробництва бетону в Україні можна охарактеризувати як такий, що розвивається, але має певні проблеми та обмеження.

Однією із головних ролей виробництва бетону в Україні є забезпечення будівництва різних об'єктів, включаючи житлові, комерційні, промислові та інфраструктурні. Бетон є одним із найбільш затребуваних та поширених будівельних матеріалів в Україні, особливо затребуваність у будівельних матеріалах зросла через численні пошкодження будівель під час війни. Виробництво бетону в Україні характеризується високою залежністю від імпорту, оскільки багато компаній використовують імпортні технології та обладнання для виробництва бетонної продукції. Крім того, виробництво бетону страждає від нестачі інвестицій, що призводить до старіння обладнання та обмеженого асортименту продукції. Через це, без належного фінансування, виробництва не здатні побудувати конкурентоспроможні АСК ТП виробництва бетону, які задовольнили би поточний попит на цей ресурс.

Виходячи з вищесказаного, стає очевидним, що незважаючи на розвинену ресурсну базу, Україні бракує сучасних АСК для вдосконалення технологічного процесу переробної промисловості, які б допомогли виробництвам зі збільшенням виробничих потужностей, щоб задовольнити хоча б потреби внутрішнього ринку [1].

1.2 Аналіз конструктивних, схемотехнічних та організаційних рішень існуючих аналогів автоматизованих систем керування для багатокомпонентних сумішей в умовах виробничих підприємств

1.2.1 Опис об'єкту управління АСК

Завдання АСК можна розбити на дві складові: контроль за сировиною та управління технологічним процесом виробництва.

Контроль за сировиною на переробній промисловості є важливим елементом забезпечення якості виробництва, для цього на виробництвах існують контрольно-вимірювальні системи. Контроль повинен здійснюватися на всіх етапах життєвого циклу сировини на виробництві - від її приймання на підприємство до використання у виробничому процесі та відвантаження готової продукції.

Основна мета контролю – гарантувати відповідність сировини встановленим стандартам та вимогам, забезпечити належну якість продукції, покращити умови праці на виробництві та знизити ризики для здоров'я працівників та довкілля.

Основними характеристиками сировини, які необхідно контролювати практично на кожному підприємстві переробної промисловості є:

— Вологість сировини – це масова частка води у сировині. Контроль вологості сировини важливий для встановлення правильних режимів сушіння, термічної обробки та інших процесів, а також для запобігання розвитку бактерій та грибків;

— Температура сировини може відігравати важливу роль у процесі переробки та впливати на якість кінцевого продукту. Контроль температури допомагає запобігти пошкодженню сировини, такі як денатурація білків або розпад хімічних сполук. Контроль температури може запобігти аваріям та забезпечити безпеку персоналу;

— Контроль кількості сировини на переробному виробництві є важливим для забезпечення стабільної роботи обладнання та досягнення

заданих характеристик продукції. Якщо кількість сировини не відповідає встановленим параметрам, це може спричинити зниженню ефективності процесу переробки, а також невідповідність якості продукції вимогам замовників. Контроль кількості сировини можна здійснювати як у процесі приймання сировини, так і у різних етапах переробки. Для цього можуть використовуватися різні методи, включаючи зважування, вимірювання об'єму за допомогою датчиків, ультразвукових або радіочастотних систем і т.д. При контролі кількості сировини необхідно також враховувати можливі втрати та відхилення від встановлених стандартів, пов'язані з неминучими фізичними процесами, такими як осадження, випаровування, утворення конденсату тощо.

1.2.2 Опис складових частин контрольно-вимірювальних систем для автоматизації процесів переробної промисловості

Підвищення ефективності АСК переробної промисловості шляхом удосконалення контрольно-вимірювальних систем сипких матеріалів є важливым кроком у побудові більш досконалих систем управління з більш високою надійністю вимірювань.

Контроль за фізичними характеристиками сировини у контрольно-вимірювальній системі виконується за допомогою первинних вимірювальних перетворювачів.

Для контролю параметру вологості сипучих матеріалів на виробництві можна використовувати мікрохвильовий датчик. Мікрохвильові датчики вологості зазвичай складаються з двох компонентів: випромінювача та приймача. Випромінювач створює електромагнітну хвилю високої частоти, яка потім прямує на поверхню матеріалу. Коли ця хвиля зустрічає вологий матеріал, вона частково поглинається матеріалом, що призводить до зміни амплітуди та фази хвилі. Приймач потім вимірює ці зміни та визначає рівень вологості матеріалу.

Мікрохвильовий датчик А314 виробництва Aquar System, зображений на рисунку 1.1, має вимірювальну поверхню датчика зі зносостійкої сталі з керамічним радіопрозорим вікном, яке відрізняється стійкістю до абразивних навантажень. Підключення до системи керування здійснюється через аналоговий струмовий вихід або цифровий інтерфейс RS-485 [2].

Рисунок 1.1 – Мікрохвильовий датчик вологості Aquar System - А314

Для вимірювання температури сипучих продуктів, надійним пристроєм для багатоточкового вимірювання температури сипучих матеріалів є термопідвіски (рисунок 1.2), які були виготовлені спеціально для відстеження параметрів зернових культур у зерносховищах. Найчастіше термопідвіска є оболонкою з несучого кабель-троса, всередині якої знаходиться шлейф з цифровими датчиками температури DS18B20 [3].

Рисунок 1.2 – Термопідвіска ТЭМИКС - ТП-ДМ

Вимірювання рівня сировини на виробництвах відбувається повсюдно, для цього використовуються засновані на принципово різних фізичних методах виміру датчики з використанням двох принципово різних систем виміру: рівнемірів та датчиків рівня. Датчик рівня та рівнемір - це два різних типи пристроїв, що використовуються для вимірювання рівня рідини або сипких матеріалів у резервуарах, ємностях тощо.

Сигналізатор рівня (також відомий як датчик рівня чи індикатор рівня) призначений для визначення наявності або відсутності продукту на певному рівні в резервуарі. Він може бути механічним, електронним або іншим типом приладу, який використовує первинний перетворювач, щоб визначити, чи досяг рівень контрольованого продукту певної позначки, і видає відповідний сигнал (наприклад, звуковий або світловий) для позначення наявності або відсутності продукту на рівні.

Рівнемір, з іншого боку, використовується для вимірювання точного рівня продукту в резервуарі. Цей пристрій може бути механічним, електронним або іншим типом приладу, який використовує первинний перетворювач, щоб виміряти рівень контрольованого продукту з високою точністю та видає цифрове значення рівня на дисплеї або іншому пристрої виведення.

Таким чином, основна відмінність між сигналізатором рівня і рівноміром полягає в тому, що перший видає сигнал для позначення наявності або відсутності продукту на певному рівні, а другий вимірює точний рівень продукту з високою точністю [4].

Існує декілька типів сигналізаторів рівня сипких матеріалів, що використовуються у різних галузях промисловості:

1) Ємнісні сигналізатори рівня (рисунок 1.3): вони працюють на основі зміни ємності між електродами при заповненні бункеру сипучими матеріалами. Плюси ємнісних сигналізаторів рівня включають:

— Високу точність вимірювання рівня сипких матеріалів;

— Широкий діапазон виміру рівня;

— Можливість роботи в різних умовах навколишнього середовища, включаючи високу температуру та вологість;

— Довговічність та надійність в експлуатації.

Від цього виду вимагається визначення максимуму при заповненні резервуара. Ємнісний сигналізатор рівня відрізняється здатністю фіксувати заповнення вмістилища рідиною або сипучим матеріалом як змішаного, так і однорідного складу.

Рисунок 1.3 – Ємнісний сигналізатор рівня CR18-8DP

Ємнісний датчик рівня сипких матеріалів не піддається впливу електромагнітних полів та різних температурних умов. Через його витривалість пристрій часто використовують у «важких» зовнішніх умовах [5].

2) Ультразвукові сигналізатори рівня (рисунок 1.4): вони вимірюють рівень сипких матеріалів на основі часу, необхідного для відбиття ультразвукових імпульсів від поверхні матеріалу і дають сигнал на спрацювання. Плюси ультразвукових сигналізаторів рівня включають:

— Високу точність виміру рівня;

— Широкий діапазон виміру рівня;

— Можливість роботи в різних умовах навколишнього середовища, включаючи високу температуру та вологість;

— Надійність в експлуатації та довговічність.

Рисунок 1.4 – Ультразвуковий сигналізатор рівня UC10000-F260-IE8R2

Такий пристрій може бути задіяний як для рідин, так і для сипких матеріалів. Його конструкція передбачає наявність аналогового або дискретного виходу, які здатні переривати заповнення при досягненні певної межі або вести постійний моніторинг наповнення [6].

3) Вібраційні сигналізатори рівня (рисунок 1.5): вони вимірюють рівень сипких матеріалів на основі зміни амплітуди вібрації або на основі зміни частоти вібрації для рідин, під час заповнення ємності. Плюси вібраційних сигналізаторів рівня включають:

— Надійність в експлуатації;
— Довговічність;
— Малий розмір та простота установки.

Рисунок 1.5 – Вібраційний сигналізатор рівня SITRANS LVL200

Датчики цієї серії використовуються в промисловості для визначення рівня таких сипких матеріалів, як зерно, цукор, сода, борошно, різні порошки, сухе молоко, гранульовані матеріали, пісок, цемент та інші. Також їх застосовують для визначення рівня рідин у резервуарах, трубопроводах, системах постачання та відведення води [7].

4) Радарні сигналізатори рівня (рисунок 1.6): вони вимірюють рівень сипких матеріалів на основі часу, необхідного для відображення радіохвиль від поверхні матеріалу. Плюси радарних сигналізаторів рівня включають:

— Високу точність виміру рівня;

— Роботу в широкому діапазоні температур та тисків;

— Висока надійність в експлуатації;

— Стійкість до впливу зовнішніх факторів: радарний датчик відмінно впорається в агресивній та вибухонебезпечній субстанції, при цьому температурні показники та тиск жодним чином не вплинуть на його роботу [8].

Рисунок 1.6 – Радарний сигналізатор рівня MIP T61

Сигналізатори рівня використовуються в автоматизованих системах керування переробної промисловості для точного контролю та управління рівнем продукту у процесі виробництва, для безперервного контролю рівня продукту у резервуарах, бункерах, трубопроводах та інших ємностях.

Дані, отримані від сигналізаторів рівня, можуть використовуватися для автоматичного керування насосами, клапанами та іншими пристроями для підтримки заданого рівня. Дані можуть бути використані для моніторингу різних параметрів, таких як щільність, в'язкість і т.д. Ці дані можуть бути використані для автоматичного керування процесом виробництва, щоб забезпечити відповідність заданим вимогам якості.

Сигналізатори рівня можуть бути підключені до систем віддаленого моніторингу, що дозволяє операторам та інженерам моніторити рівень та інші параметри процесу виробництва із будь-якого місця. Це особливо корисно у випадках, коли процес знаходиться у віддаленому місці або потребує постійного моніторингу [4].

Зразковий приклад розташування датчиків у бункері показано на рисунку 1.7.

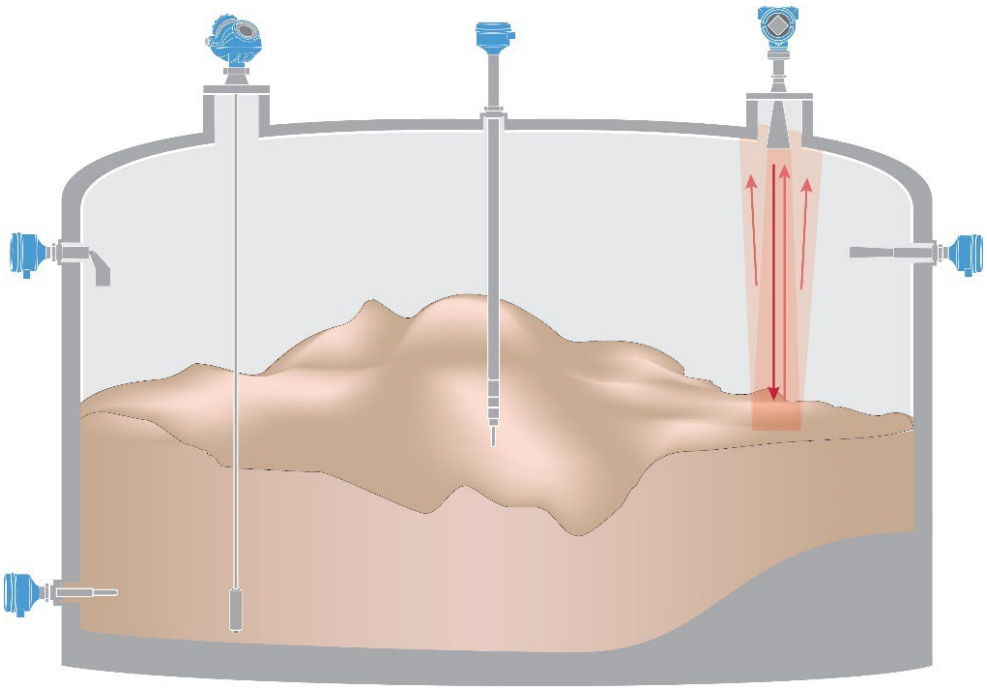


Рисунок 1.7 – Розміщення різних типів датчиків у бункері

1.3. Обґрунтованість використання вібраційного датчика камертонного виконання, аналіз патентів

1.3.1 Використання датчика вібраційного типу в переробній промисловості України

Елеваторне обладнання є критично важливим для української економіки, оскільки воно відіграє ключову роль у збиранні, зберіганні та транспортуванні зерна та інших сільськогосподарських культур. Україна є одним із найбільших виробників зерна у світі, тому ефективна та надійна інфраструктура для збирання та зберігання зерна є необхідністю.

У світлі вищевикладеного можна зробити висновок, що елеваторне обладнання є невід'ємною частиною української економіки та відіграє важливу роль у сільському господарстві та продовольчій безпеці країни.

З цієї причини тема виробництва елеваторного обладнання в Україні завжди була найбільш актуальною [1].

На всіх етапах зберігання та використання на виробництві виникає необхідність у контролі рівня зернових культур. З кількох причин, з цією метою найкраще справляються вібраційні датчики:

1) Не схильні до впливу температурних змін, пилу, вологи та інших зовнішніх факторів, які часто стають причинами помилкових спрацьовувань в інших типів датчиків;

2) Не чутливий до властивостей середовища;

3) Відсутній знос;

4) Універсальний, можна використовувати без калібрування;

5) Мають нижчу вартість проти інших типів датчиків;

6) Прості в монтажі та обслуговуванні.

І хоча ті ж самі вібраційні сигналізатори рівня підходять під різноспрямовану переробну промисловість через схожість фізичних властивостей сипучого продукту, але частка використання та розробок їх для елеваторів переважає інші типи датчиків.

1.3.2 Аналіз патентної інформації

Нині, на ринку України можна виділити наступні популярні сигналізатори рівня вібраційного типу:

— FineTek – SC
— Nivelco – Nivoswitch
— Vega – Vegawave
— Siemens – Sitrans
— UWT – Vibranivo
— Specita – SP
— Endress+Hauser – Soliphant [9]

Вібраційний датчик рівня FineTek SC. Зовнішній вигляд вібраційних датчиків компанії FineTek показано на рисунку 1.8. Пристрій складається з двох п'єзоелектричних елементів, які вбудовані в резонаторну систему у вигляді вилки-камертону або трубки. Принцип роботи даного датчика рівня полягає у впливі п'єзоелемента на резонаторну систему, в якій виникають механічні коливання великої потужності до резонансу.

При контакті з вимірюваною середовищем амплітуда коливань чутливого елемента різко падає до повної зупинки. Зміна станів елемента, що коливається, фіксується другим п'єзоелементом, який подає сигнал на схему управління. Остання перетворює отриманий сигнал, у результаті спрацьовує вихід датчика на реле.

Рисунок 1.8 - Вібраційні сигналізатори рівня виробництва FineTek

Короткі технічні характеристики FineTek SC:

— Не потрібне калібрування;

— За рахунок механічних коливань датчика робоче середовище не налипає на його корпус;

— Передбачена можливість налаштування чутливості;

— Інтервал робочих температур пристрою: -10 °C - +60 °C;

— Інтервал робочих тисків: від вакууму до 40 бар;

— Напруга джерел живлення: від 20 до 250 В (змінний струм), від 20 до 60 В (постійний струм);

— Затримка спрацьовування датчика – 0,6 с, встановлювана 2-5 сек;

— Вхідний струм: реле 2 А або 5 А, напруга 250 В (змінний струм), однополюсний вхід;

— Довжина чутливого елемента: від 0,1 до 15 м;

— Захист IP65;

— Діапазон вимірювання сипких продуктів: від 320 г/л [10].

Вібраційний датчик рівня Nivelco – Nivoswitch. Зовнішній вигляд вібраційних датчиків компанії Nivelco показано на рисунку 1.9. Вібраційні вилкові перемикачі рівня NIVOSWITCH підходять для визначення рівня рідин або гранульованих, порошкоподібних твердих речовин. Агрегати з паралельною вібровилкою підходять для рідин, агрегати з непаралельною вібровилкою підходять для твердих речовин.

Ці пристрої, встановлені на трубах, силосах, резервуарах або бункерах, можуть контролювати наповнення/спорожнення, а також створювати безпечні сигнали тривоги, забезпечуючи захист від переповнення або сухого ходу. Принцип роботи заснований на тому, що електронна схема збуджує датчик вилки, змушуючи його вібрувати. Коли середовище досягає і накриває вилку, її вібрація змінюється або припиняється. Вилка знову почне вільно вібрувати, коли середовище звільнить її. Електроніка відчуває зміну вібрації та подає вихідний сигнал після вибраної затримки. Версія з пластиковим покриттям рекомендована для агресивних середовищ, високополірована версія рекомендована для абразивних середовищ.

Версії транзисторного виходу PNP/NPN можна підключити безпосередньо до ПЛК або релейного блоку. Вібраційні вилки NIVOSWITCH здатні вирішувати завдання комутації сильнострумових навантажень за допомогою комутаційних підсилювачів UNICONT PKK. Іскробезпечний комутаційний блок UNICONT PKK-312-8 Ex призначений для обслуговування вібраційних датчиків із класом Ex.

Рисунок 1.9 - Вібраційні сигналізатори рівня виробництва Nivelco

Короткі технічні характеристики Nivelco – Nivoswitch:

— Компактний і міні-компактний тип;

— Подовження штанги до 3 метрів;

— Полірована вібраційна частина;

— Гігієнічні версії з різними процесами з'єднання та тонке полірування 0,5 мікрон;

— Регульована чутливість;

— Релейний або електронний вихід;

— Продуктивність перемикання не залежить від зміни провідності рідини, діелектричної проникності, тиску і температури;

— Інтервал робочих температур пристрою: -40 °C - +130 °C;

— Перевірка виходу за допомогою додаткового тестового магніту;

— Затримка спрацьовування датчика – регульована;

— Захист IP67, IP65/IP68.

— Діапазон вимірювання сипких продуктів: від 10 г/л [11].

Вібраційний датчик рівня Siemens – Sitrans. Зовнішній вигляд вібраційних датчиків компанії Siemens показано на рисунку 1.10. Вібраційні датчики Sitrans LVS у стандартному виконанні детектують максимальний або мінімальний рівень сипучих матеріалів в ємностях, силосах або бункерах. Сигналізатор рівня Siemens LVS 200 у виконанні для реєстрації розділового шару може чітко реєструвати межу між твердою та рідкою фазами матеріалу. Вібраційний датчик рівня LVS має вихід 4-20 мА (як опція) для контролю відкладень на вилці для визначення необхідності виконання техобслуговування.

Вібраційні датчики рівня для сипких речовин Sitrans LVS мають компактний дизайн і можуть встановлюватись вертикально або збоку ємності. Завдяки особливостям конструкції та принципу дії вібраційних датчиків рівня, вібраційна вилка має здатність у процесі роботи самоочищатися від налипає детектованого матеріалу.

Рисунок 1.10 - Вібраційні сигналізатори рівня виробництва Siemens

Короткі технічні характеристики Siemens – Sitrans:

— Не потрібне калібрування;

— За рахунок механічних коливань датчика робоче середовище не налипає на його корпус. Можливість перевірити налипання матеріалу на чутливий елемент;

— Передбачена можливість налаштування чутливості;

— Інтервал робочих температур пристрою: -40 °С - +150 °С;

— Інтервал робочих тисків: від вакууму до 10 бар;

— Напруга джерел живлення універсальна: від 19 до 230 В (змінний струм), від 19 до 50 В (постійний струм);

— Затримка спрацьовування датчика – 0,6 с;

— Вхідний струм: реле 2 А або 5 А, напруга 250 В (змінний струм), однополюсний вхід;

— Довжина чутливого елемента: до 20 м;

— Захист IP67, IP65/IP68.

— Діапазон вимірювання сипких продуктів: від 5 г/л [7].

Вібраційний датчик рівня Vega – Vegawave. Зовнішній вигляд вібраційного датчика компанії Vega показано на рисунку 1.11.

Вібраційні сигналізатори моделі VEGAWAVE 63 використовують, щоб сигналізувати про досягнення певного рівня речовинами, що належать до категорій порошкоподібних сипучих і дрібнозернистих сипучих. Це дуже надійні датчики, здатні з досить високим ступенем точності виконати своєчасне надсилання сигналу про досягнення min/max рівнів. Вибруюча вилка, яка грає роль робочого елемента пристрою, має конструкцію, придатну для роботи з сипучими продуктами, що мають малу щільність, а також з продуктами, що налипають та абразивними. Положення точки перемикання задає довжина трубки подовжувача.

Рисунок 1.11 - Вібраційний сигналізатор рівня виробництва Vega

Короткі технічні характеристики Vega – Vegawave:

— Не потрібне калібрування;

— За рахунок механічних коливань датчика робоче середовище не налипає на його корпус

— Передбачена можливість налаштування чутливості;

— Інтервал робочих температур пристрою: -50 °C - +250 °C;

— Інтервал робочих тисків: від вакууму до 64 бар;

— Напруга джерел живлення універсальна: від 20 до 253 В (змінний струм), від 20 до 60 В (постійний струм);

— Затримка спрацьовування датчика – залежить від режиму роботи, налаштувань та конфігурації пристрою. У режимі стандартного реле рівня затримка становить близько 0,5 секунди;

— Вхідний струм: реле 2 А або 5 А, напруга 250 В (змінний струм), однополюсний вхід;

— Довжина чутливого елемента - до 6 м;

— Захист IP67, IP65/IP68.

— Діапазон вимірювання сипких продуктів: від 8 г/л [8].

1.4 Завдання на проектування

Відповідно до мети роботи однією із підзадач поставлено створення вібраційного датчика граничного рівня камертонного типу, а також його застосування в системах контролю рівня сипучого матеріалу в умовах переробної промисловості. Даний пристрій повинен точно визначати наявність або відсутність сипучого матеріалу в зоні його дії і передавати сигнал на програмований логічний контролер системи контролю рівня для роботи оператора з цими даними.

Опираючись на оглянуту літературу та патентну інформацію за темою мого дипломного проекту, було визначено головні задачі на проектування:

Для досягнення визначеної цілі були сформульовані наступні завдання:

1. Розібрати архітектуру АСК та розробити функціональну схему АСК ТП із застосуванням датчиків граничного рівня.
2. Сформувати блок-схему алгоритму управління виконавчими пристроями залежно від рівня сипучого матеріалу
3. Розробити схеми: функціональну, електричну принципову та підключення датчика.
4. Виконати проектування конструкції вібраційного датчика у середовищі AutoCAD.
5. Виконати моделювання процесів роботи вібраційного датчика за різних умов використовуючи програмне забезпечення COMSOL.
6. Розглянути питання охорони праці та безпеки у надзвичайних ситуаціях.

1.5 Висновки до розділу І

1. Під час аналізу літературних джерел та економічних даних встановлено, що галузь виробництв підготовки сировини та переробної промисловості, що використовує у технологічному процесі сипкі матеріали потребує переоснащення. Тенденції розвитку автоматизованих систем переробної промисловості засвідчують потребу впровадженя інноваційних контрольно-вимірювальних автоматизованих систем як складової для їх повної автоматизації.
2. Приклади існуючих рішень фірм - лідерів світових виробників датчиків для контрольно-вимірювальних виробничих систем аргументовано засвідчують потребу переходу до більш удосконалених систем автоматизації вимірювань та спостереження.
3. Детальний аналіз впровадження окремих датчиків рівня засвідчує, що більш ефективним є комбіноване впровадження датчиків нижнього рівня АСУ ТП, таких як: датчик вологості, температури та рівня. Таке сумісне використання розширює їх функції і відіграє суттєву роль кожного з них на різних етапах виробництва.
4. Аналіз конструкції, принципу роботи, характеристик та можливостей визначає, що інноваційно привабливими на ринку України та у світі є вібраційні датчики у комплексному застосуванні з датчиками вологості, температури та рівня для розвитку автоматизованих систем таких галузей переробної промисловості та будівельних сумішей.

РОЗДІЛ ІІ. СТРУКТУРНІ, КОСТРУКТОРСЬКІ ТА СХЕМОТЕХНІЧНІ І АЛГОРИТМІЧНІ РІШЕННЯ, МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ, ЩО РЕАЛІЗОВУВАТИМУТЬ АСК

2.1 Узагальнена структура АСК виготовлення сумішей в умовах виробничих підприємств

АСК ТП – це комплексне програмно-апаратне рішення, яке дозволяє автоматизувати керування технологічними процесами у різних галузях промисловості. Структура АСК ТП включає кілька компонентів, її узагальнену схему представлено на рисунку 2.1.

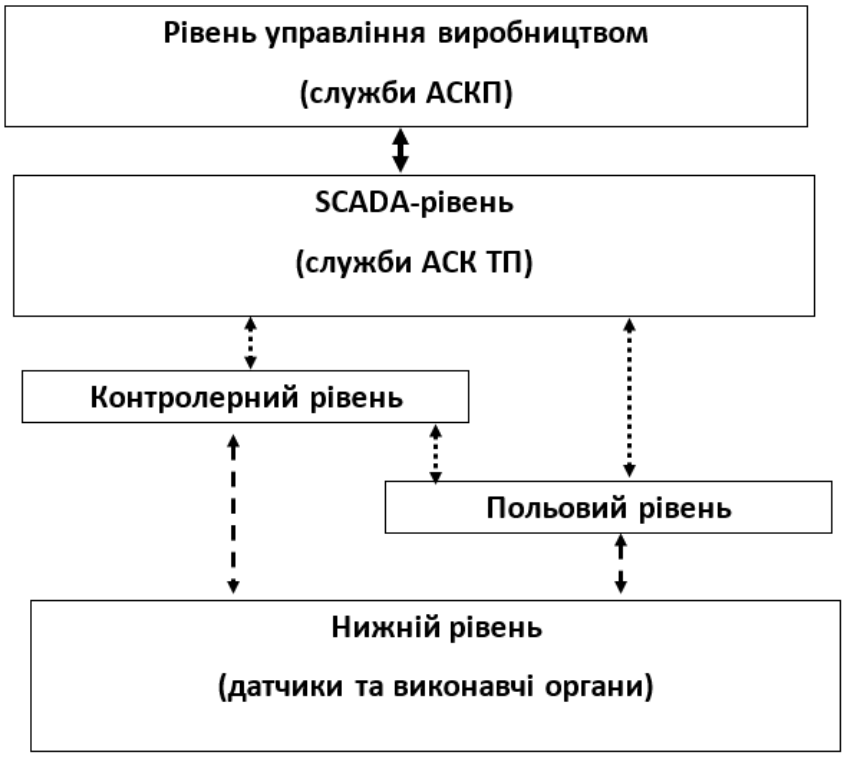


Рисунок 2.1 – Архітектура систем керування

На рисунку застосовано позначення нижній (периферійний) рівень, під яким позначено засоби автоматизації, що знаходяться безпосередньо на технологічних об'єктах. Це датчики, виконавчі механізми та блоки комутації.

Управління виконавчими механізмами: клапанами, електродвигунами стрічкових конвеєрів, насосами та іншими пристроями переробної промисловості відбувається саме за рахунок датчиків та засобів комутації за допомогою добре налагодженої АСК ТП.

Перетворювач частоти (також відомий як змінний привід, перетворювач змінного струму або перетворювач частоти та напруги) використовується для управління швидкістю обертання електричних двигунів, таких як асинхронні або синхронні двигуни.

Засоби зв'язку – це компоненти, які забезпечують зв'язок між різними компонентами АСК ТП, такими як контролери, комп'ютери та датчики в локальну мережу, зазвичай використовуючи:

— протоколи Ethernet або Profibus;

— бездротові мережі, у випадках, коли дротовий зв'язок неможливий або неефективний - бездротові мережі, такі як Wi-Fi або Bluetooth;

— також можуть бути пов'язані між собою через інтернет-протокол, дозволяючи оператору отримати доступ з будь-якої точки світу;

— кабельні з'єднання: коаксіальний кабель, оптичний кабель або простий багатожильний кабель.

Також важливими є джерела живлення, хоч вони і не займають свого місця в ієрархії побудови АСК ТП та на схемі умовно не показані. Найчастіше для живлення датчиків та контролерів використовується перетворювач AC/DC 220-24V, потужність якого обирається під конкретні умови використання.

Сучасні технології вимірювань та управління широко використовує інтелектуальні датчики та виконавчі механізми, які мають власні мікропроцесори, що дозволяє обробляти інформацію за місцем вимірювань, проводити діагностику роботи виконавчих механізмів, розвантажуючи таким чином технологічні комп'ютери та канали зв'язку та підвищуючи оперативність управління. Мікропроцесорні контролери інтелектуальних датчиків та виконавчих механізмів утворюють «польовий рівень».

Алгоритми управління окремими технологічними параметрами реалізовані за допомогою мікропроцесорних контролерів (контролерний рівень), що програмуються на SCADA - рівні.

В АСК ТП переробної промисловості широко використовують ПЛК виробництва компанії Siemens та Mitsubishi electric.

Також, широкого поширення досяг повторювач інтерфейсу послідовних сигналів, який допомагає вирішити дві проблеми, пов'язані з передачою даних за інтерфейсом RS-485. По-перше, він дозволяє подолати обмеження довжини кабелю до 1,2 км. По-друге, він використовуватися для розширення мережі пристроїв, оскільки стандарт RS-485 обмежує кількість вузлів зв'язку до 256.

SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) - це комплексне програмно-технічне рішення, призначене для моніторингу та управління технологічними процесами в режимі реального часу. Вони дозволяють операторам контролювати стан обладнання та процесів, а також приймати рішення щодо керування на основі даних, зібраних з датчиків та інших пристроїв. Однією з головних переваг SCADA систем є зручність використання та налаштування. Вони забезпечують простий та інтуїтивно зрозумілий інтерфейс для операторів, який дозволяє швидко та ефективно керувати процесами та особливо вирішувати проблеми діагностування і прогнозування передаварійних станів.

SCADA системи також забезпечують широкий спектр функціональності, включаючи моніторинг стану обладнання, контроль параметрів процесів, управління виконавчими механізмами, збирання та аналіз даних, оповіщення про виникнення аварій і т.д. Крім того, SCADA системи можуть бути інтегровані з іншими системами управління (АСКП), такими як ERP (Enterprise Resource Planning - управління ланцюгом поставок), MES (Manufacturing Execution System - забезпечує планування та розклад виробничих операцій, включаючи визначення послідовності операцій, розподіл ресурсів, облік часу виконання та управління пріоритетами), що дозволяє забезпечити більш ефективне та комплексне керування виробничими процесами.

В цілому, SCADA системи мають високу гнучкість і адаптивність, що дозволяє адаптувати їх під різні потреби і вимоги конкретного підприємства. Вони є важливим елементом у підвищенні ефективності виробництва та покращенні якості продукції [12].

2.2 Функціональна схема АСК та блок-схема алгоритму управління конвеєрною лінією

Характерний приклад іноваціних пропозицій архітектури АСК технологічного процесу представлено на рисунку 2.2. Його функціональна схема відображає місце та зв’язки кожного компонента з іншими елементами архітектури АСК ТП об'єкта.

Нижній (периферійний) рівень об'єкта являє собою датчики граничного рівня, які розміщені в різних типових ємностях для зберігання сипких матеріалів, а також виконавчі механізми, керування режимами роботи якими проводиться за допомогою датчиків та засобів комутації. До кожного з датчиків підходить червоний силовий кабель живлення, виходить кабель з релейним сигналом, що підключається до одного з дискретних входів ПЛК. ПЛК у свою чергу виконує інструкції та пов'язує між собою робоче місце оператора та виконавчі механізми, керуючи ними у промисловій мережі асинхронного інтерфейсу RS-485.

Між ПЛК та перетворювачем частоти (ПЧ) розміщується повторювач інтерфейсу (ПІ), що збільшує максимальну довжину лінії інтерфейсу і збільшує кількість вузлів у мережі RS-485, що в реаліях промислових об'єктів дуже доречно, через великі довжини лінії інтерфейсу та кількості виконавчих механізмів (виконується від контролю виробництва продукту до управління вуличним освітленням).

Для управління виконавчими механізмами використовується ПЧ, за допомогою нього виконується плавна робота практично будь-якого двигуна на виробництві, на яких тримається механічна робота, наприклад, переміщення об'єктів. Всі ПЛК зводяться до Switch, який відіграє ключову роль у забезпеченні комунікацій та зв'язків між пристроями середнього та верхнього рівня в промисловій мережі [12].

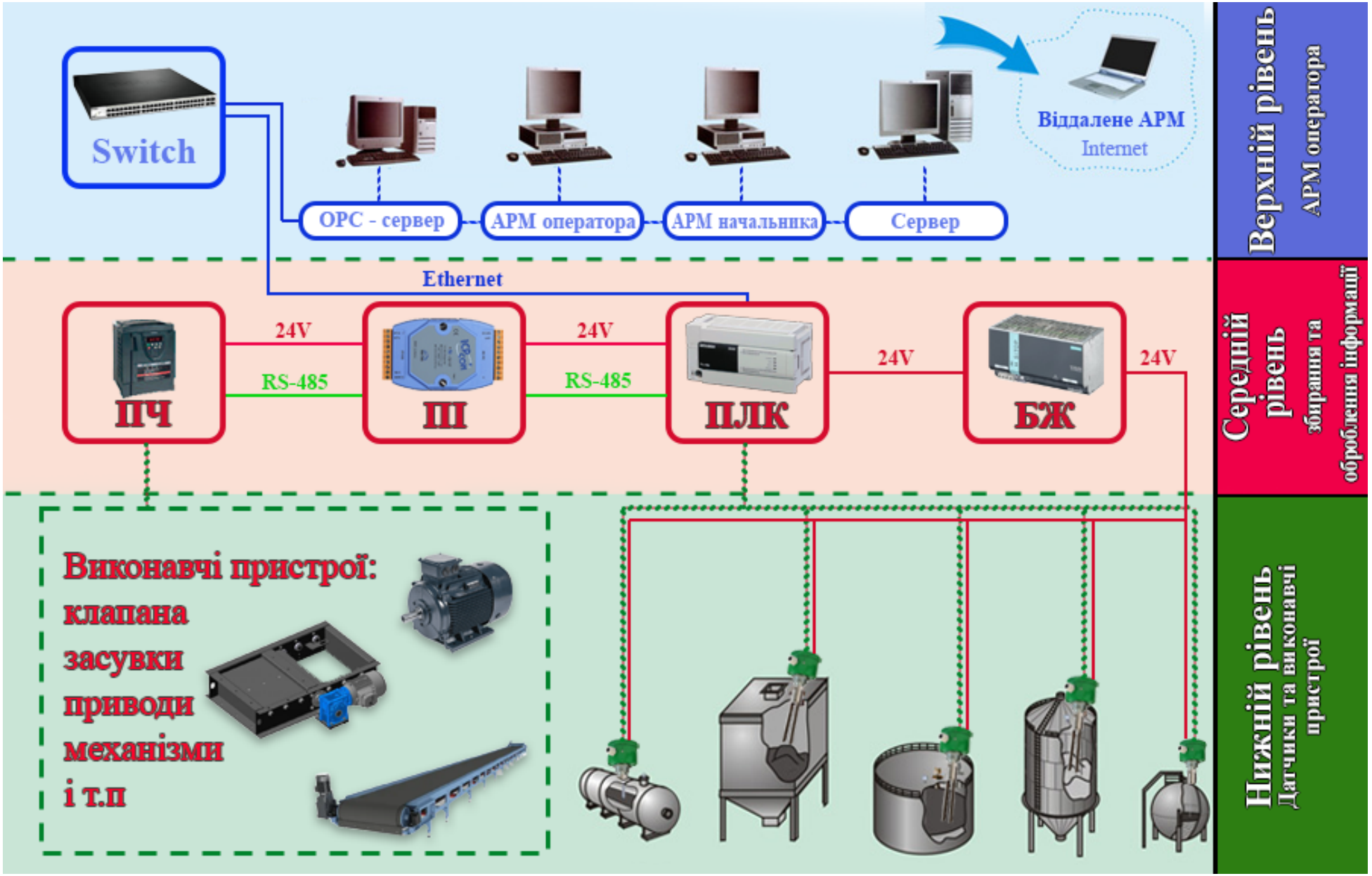


Рисунок 2.2 – Функціональна схема АСК

рівнем сипучого продукту та виконавчими пристроями

Блок-схема управління побудована на прикладі елеватора, де широко використовуються сигналізатори граничного рівня.

Наприклад, сигналізатори рівня можуть використовуватися для керування завантаженням сипкого продукту у бункер, алгоритм якого можно побачити на рисунку 2.3. Для цього сигналізатори рівня встановлюються на стінках бункера для контролю рівня продукту усередині.

Коли рівень продукту досягає заданого рівня, сигналізатор рівня відправляє сигнал на систему керування завантаженням у бункер. Якщо рівень продукту в бункері досягає максимального рівня, система управління може зупинити процес завантаження або знизити швидкість конвеєра, щоб запобігти переповнення.

Крім того, сигналізатори рівня можуть бути використані для керування витратою продукту під час завантаження. Наприклад, при необхідності зменшити кількість продукту, що завантажується в бункер, сигналізатор рівня може відправити сигнал на систему керування завантаженням, щоб зменшити швидкість конвеєра або інших пристроїв, які використовуються для завантаження [13].

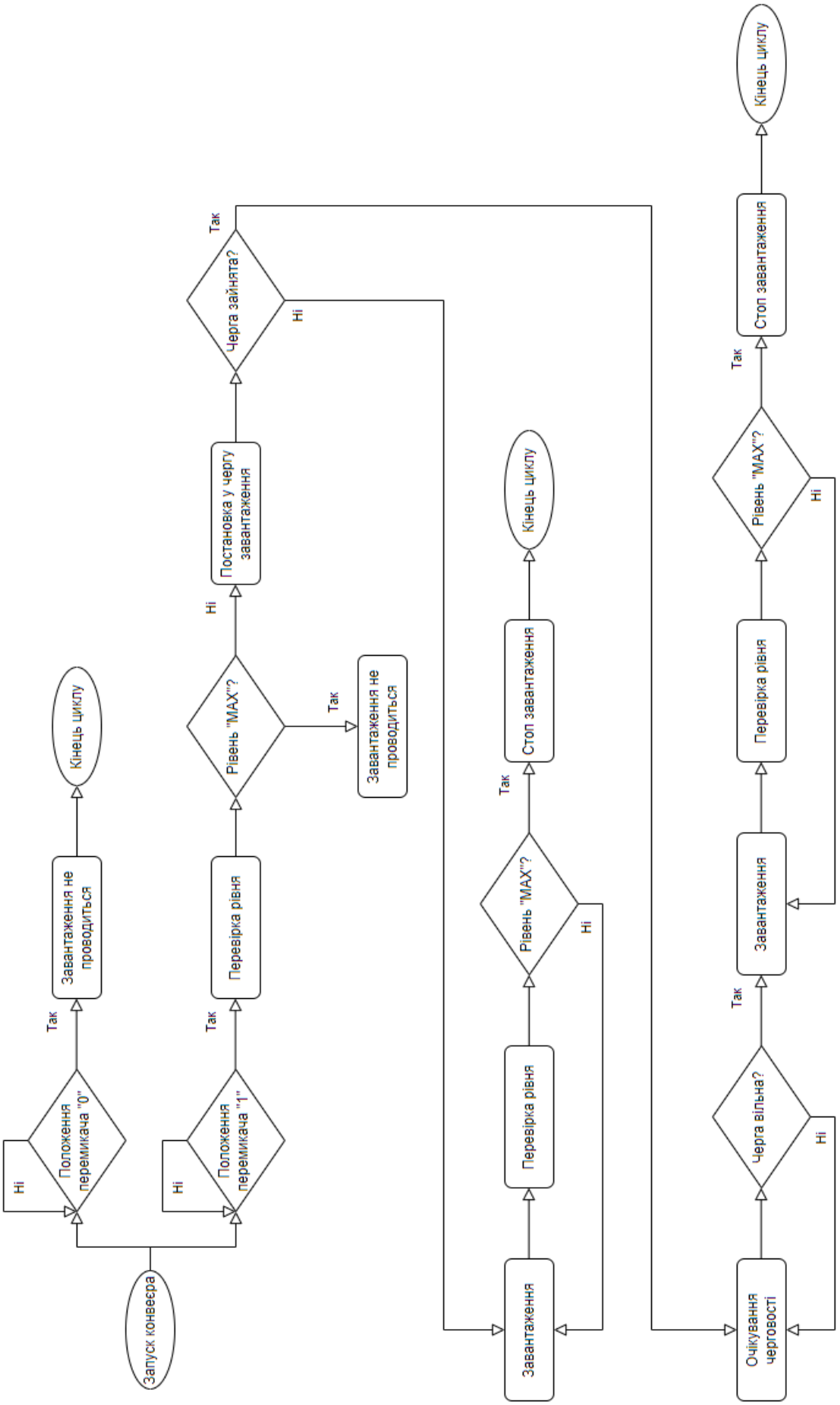


Рисунок 2.3 – Алгоритм роботи системи керування конвеєрною лінією в залежності від рівня сипкого продукту

2.3 Проектування, вибір і опис блоків для автоматизованої системи в умовах виробничих підприємств на прикладі зерносховища та бетонного виробництва.

2.3.1 Опис конструкції вібраційного датчика

Основою контрольно-вимірювальної системи рівня сипучих матеріалів є вібраційний сигналізатор рівня.

Конструктивні складові частини вібраційного сигналізатора рівня можуть відрізнятися в залежності від виробника та моделі пристрою, однак у загальному випадку вони включають такі елементи:

— П’єзомодуль – це елемент, який генерує механічні коливання та використовується для сигналізації про рівень речовини. Резонатор може бути виконаний у вигляді п'єзоелектричного кристала, керамічної пластини або іншого матеріалу, здатного коливатися з високою частотою.

— Датчик – це елемент, який перетворює механічні коливання резонатора на електричний сигнал. Датчик може бути виконаний у вигляді п'єзоелектричного кристала або іншого пристрою, який здатний перетворювати механічну енергію на електричну.

— Електроніка – це схеми та пристрої, які обробляють та аналізують сигнали, що надходять від датчика. Електроніка може включати підсилювачі, фільтри, аналогово-цифрові перетворювачі та інші пристрої.

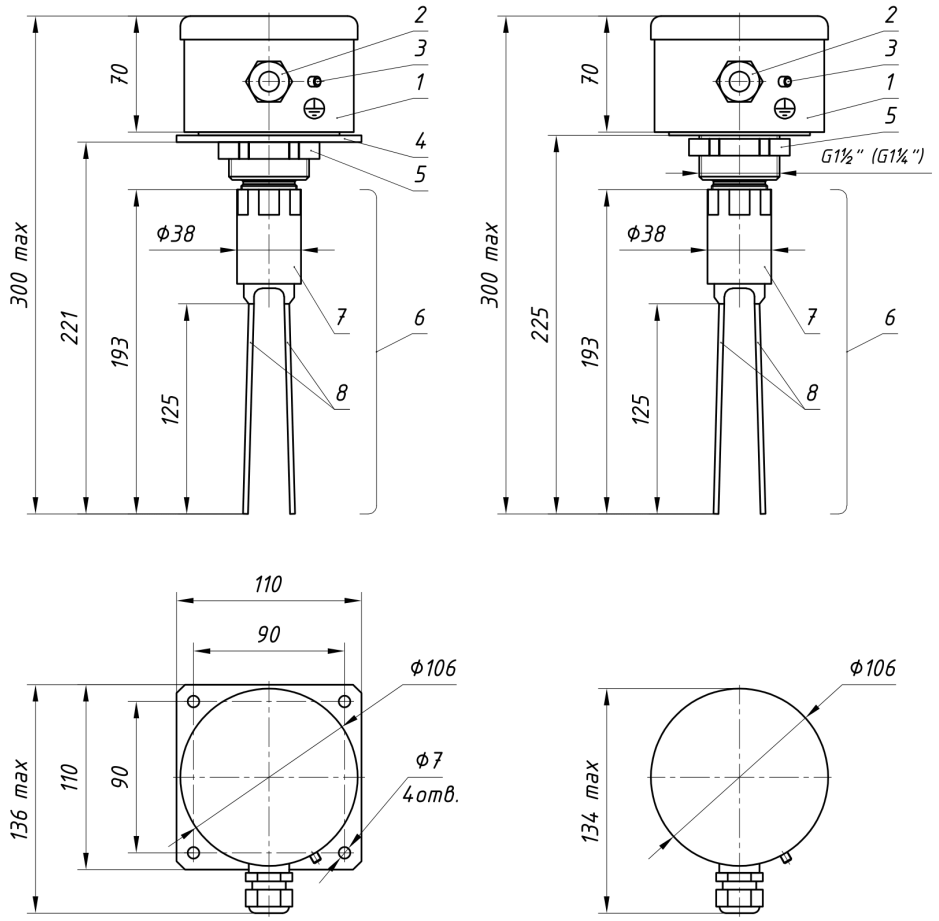
— Корпус – це оболонка, яка захищає вібраційний сигналізатор рівня від зовнішніх впливів, таких як удари, пил та волога. Корпус може бути виконаний із різних матеріалів, таких як пластик або метал.

— Кабель – це елемент, який дозволяє підключити вібраційний сигналізатор рівня до електричної мережі або інших пристроїв.

Монтажні кріплення – це елементи, які дозволяють встановити вібраційний сигналізатор рівня на ємності чи резервуарі. У більшості випадків

їх можна розділити на: різьбові (кріплення в ємності виконується за допомогою вкручування датчика в заздалегідь підготовлений отвір з нарізаним різьбленням - бобишкою) та фланцеві (вага датчика спирається на металевий фланець, який кріпиться до ємності за допомогою болтів) [14].

Зовнішній вигляд вібраційного сигналізатора рівня камертонного типу (далі за текстом - Датчик) без подовжувача резонатора з позиціями складових частин, його габаритні та приєднувальні розміри для фланцевого і різьбового монтажу представлено на рисунку 2.4



1) Датчик для фланцевого монтажу 2) Датчик для різьбового монтажу

Рисунок 2.4 – Датчик (без подовжувача резонатора).

Зовнішній вигляд Датчика з подовжувачем резонатора та позиціями складових частин, його габаритні та приєднувальні розміри для різьбового монтажу представлено на рис. 2.5. Фланцевий тип Датчику з подовжувачем умовно не показаний на рисунку 2.5, оскільки розміри фланця (поз. 4 на рисунку 2.4) для цих типів датчика не відрізняються.

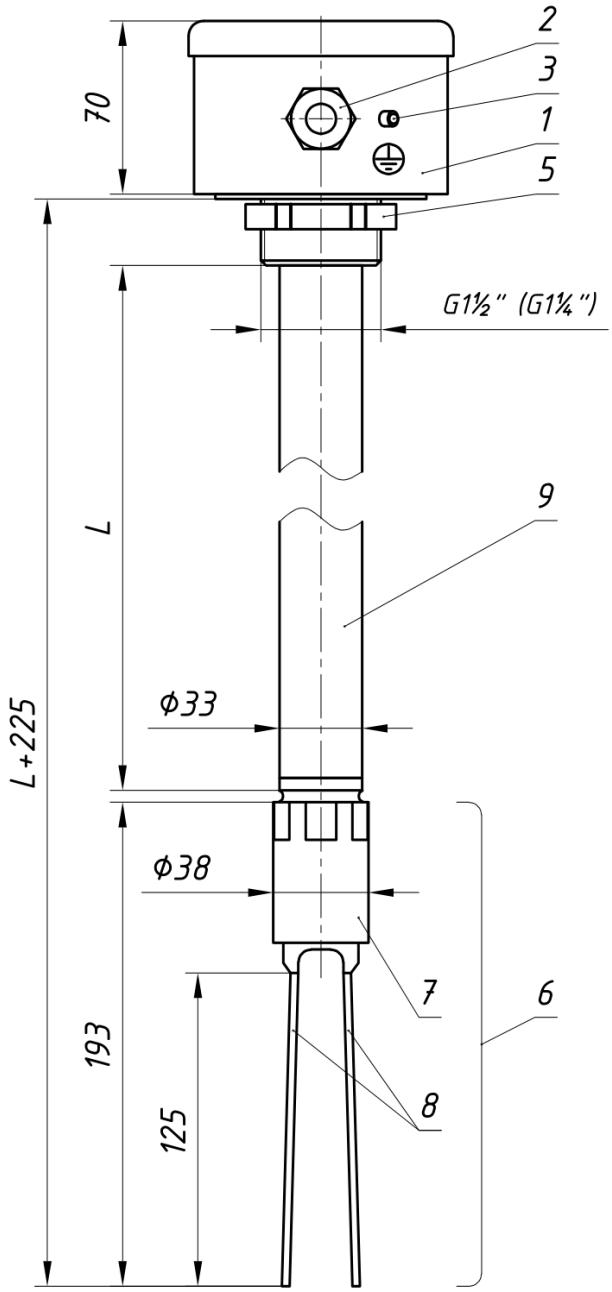


Рисунок 2.5 – Датчик (з подовжувачем резонатора L<1м)

До складу Датчика входить резонатор (поз. 6), який складається з корпусу резонатору (поз. 7) з п’єзомодулем, розміщеним в ньому та двох приварених до нього лопаток (поз. 8). До резонатору Датчика за допомогою різьби приєднується корпус електронного блоку (поз. 1) та фланець (поз. 4), у випадку фланцевого монтажу Датчика. В середині корпусу електронного блоку розміщені модуль контролера та модуль живлення, а ззовні на корпусі закріплено кабельний ввід (поз. 2) і шпилька для заземлення (поз. 3). До складу

Датчика для різьбового монтажу входить гайка G1½″ або G1¼″ (поз. 5) для кріплення Датчика до ємності. При необхідності Датчик може комплектуватися подовжувачем резонатора (поз. 9), який закріплюється між корпусом резонатора і корпусом електронного блока.

Зовнішній вигляд електронного блока, взаємне розташування модулів живлення і контролера, розташування світлових індикаторів, перемикача режимів роботи і клем для підключення Датчика приведенні на рисунку 2.6

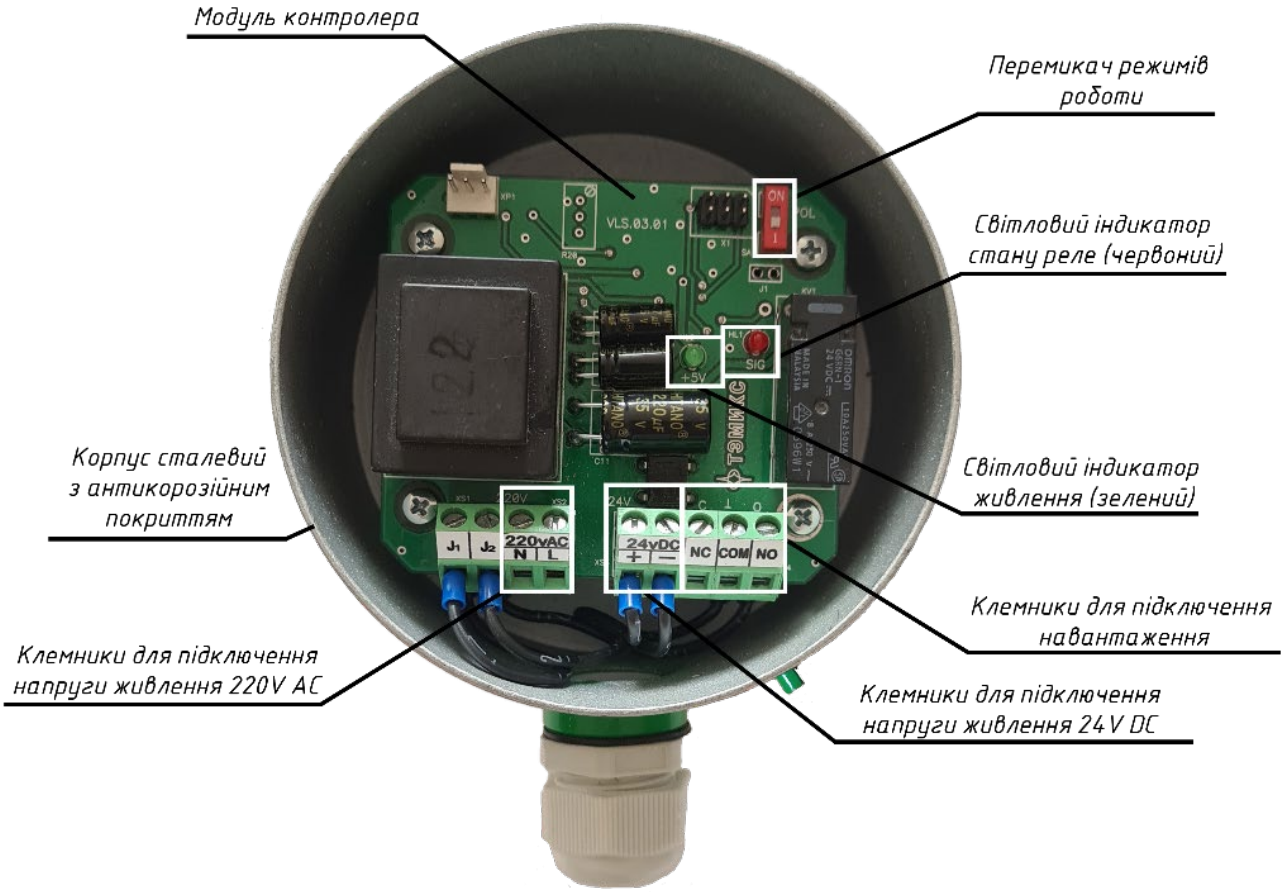


Рисунок 2.6 - Фото електронного блоку Датчика

Резонатор Датчика вібрує на своїй резонансній частоті під впливом п'єзоелектричних елементів, які входять в склад п’єзомодуля. Під час занурення лопаток резонатора в контрольований продукт або звільнення від нього, відбувається зміна амплітуди коливань, що зі свого боку реєструється модулем контролера, який відповідно до режиму роботі Датчика, видає команду на спрацювання світлового індикатора стану реле та комутації навантаження, що підключається до контактів реле модуля контролера.

2.3.2 Основні дані та технічні характеристики Датчика

1.	Габаритні розміри без подовжувача резонатора.....	не більш ніж 110 × 136 × 300мм;
2.	Маса в комплектації без подовжувача резонатора.....	не більш ніж 2,5 кг;
3.	Температура контрольованого продукту	від -40°С до +60°С;
4.	Робочий температурний діапазон.	від -40°С до +85°С;
5.	Робочий тиск.....	1атм.;
6.	Кліматичне виконання за ГОСТ 15150-69	УХЛ1.1;
7.	Матеріал резонатора	нержавіюча сталь;
8.	Матеріал корпусу електронного блока	нержавіюча сталь / сталь з антикорозійним покриттям / інше;
9.	Клас за способом захисту від ураження електричним струмом згідно з ГОСТ 12.2.013.0-91	I;
10	Живлення	UжDC=24В±10% UжAC=100 – 240В Рспож – не більш ніж 1Вт;
11	Навантаження, що підключається	UмаксDC=24В UмаксAC=250В Імакс=8А;
12	Сигналізація спрацьовування	ввімкнення світлового індикатору стану реле;
13	Час спрацювання.....	2-3сек.

Датчик має два режими роботи і залежно від обраного режиму у Датчика є можливість видавати керуючий сигнал при досягненні сипучим продуктом рівня, на якому його встановлено, як при завантаженні так і при вивантаженні ємності.

За захищеністю від доступу до небезпечних частин, а також від попадання зовнішніх твердих предметів і води відповідно до ГОСТ 14254-80 Датчик відповідає ступеню захисту IP65.

Під час експлуатації Датчик не створює випромінювань і не виділяє токсичних речовин. Рівень шуму, що генерується Датчиком не більш ніж 40дБА, що за умовами використання відповідно до ГОСТ 12.1.003-83 не перевищує 80дБА.

2.3.3 Порядок монтажу Датчика

Датчик встановлюється на корпусі ємності відповідно до висоти контрольованого рівня. Водночас лопатки резонатора повинні розташовуватися паралельно руху продукту. За необхідності відстеження рівня на певній відстані від корпусу ємності використовується Датчик з подовжувачем резонатора.

Допустимі і заборонені способи монтажу Датчика представлені на рисунку 2.7.

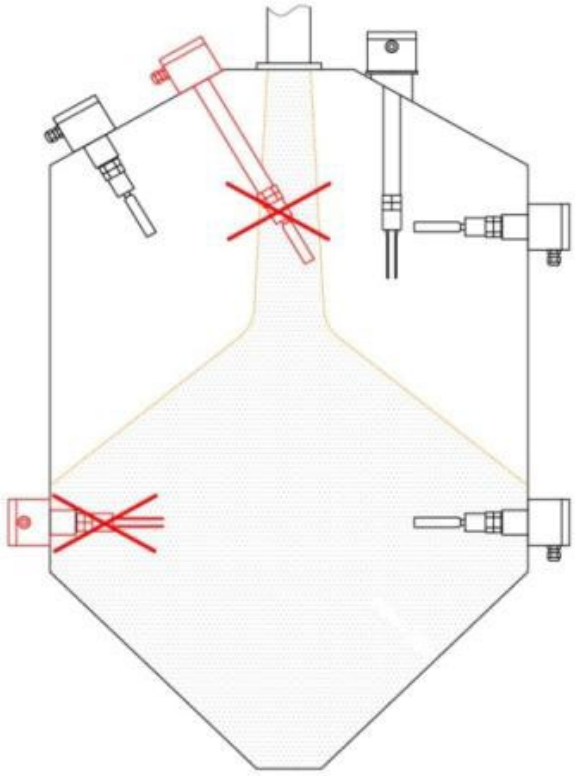


Рисунок 2.7 - Допустимі і заборонені способи монтажу датчика граничного рівня.

Забороняється монтаж Датчика наступними способами:

— з розташуванням резонатора у потоці продукту, яким наповнюється ємність;

— з розташуванням резонатора відносно потоку продукту на відстані ближче ніж 0,5м;

— з орієнтацією площини лопаток резонатора перпендикулярно по відношенню до напрямку руху потоку продукту.

2.3.4 Порядок підключення Датчика

Електронний блок Датчика для виконання датчика з напругою живлення ~220V складається із двох модулів, які виконані на окремих друкованих платах. Плата модуля живлення розташована під платою модуля контролера і має два клемника XS21 і XS22. Електронний блок Датчика з напругою живлення = 24V містить тільки плату контролера. Плата контролера має чотири клемники XS1, XS2, XS3 та XS4.

Таблиця 2.1 – Відповідності клем для підключення Датчика

Модуль	**Клемник**	**Контакт**	**Назва ланцюга**	**Опис**
Модуль живлення	XS21	J_1	~220V	Підключення живлення змінного струму напругою 100 – 240В.
		J_2	~220V	
	XS22	+	=24V	Вихід джерела постійного струму 24В.
		-	=24V	
Модуль контролера	XS1	J_1	~220V	Вихід змінного струму напругою 100 – 240В.
		J_2	~220V	
	XS2	N	~220V	Підключення живлення змінного струму напругою 100 – 240В.
		L	~220V	
	XS3	+	=24V	Вхід живлення постійного струму 24В.
		-	=24V	
	XS4	NC	C	Нормально замкнена група контактів.
		COM	⊥	Загальний контакт
		NO	O	Нормально розімкнена група контактів.

Схеми підключення Датчика до напруги живлення 220V AC та 24V DC показані відповідно на рисунках 2.8 та 2.9.

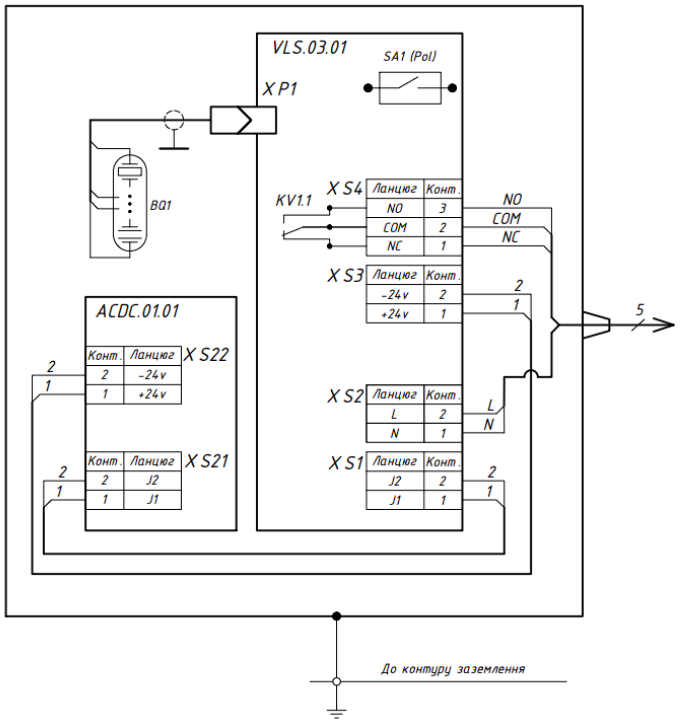


Рисунок 2.8 - Схема підключення Датчика, U жив =220V AC

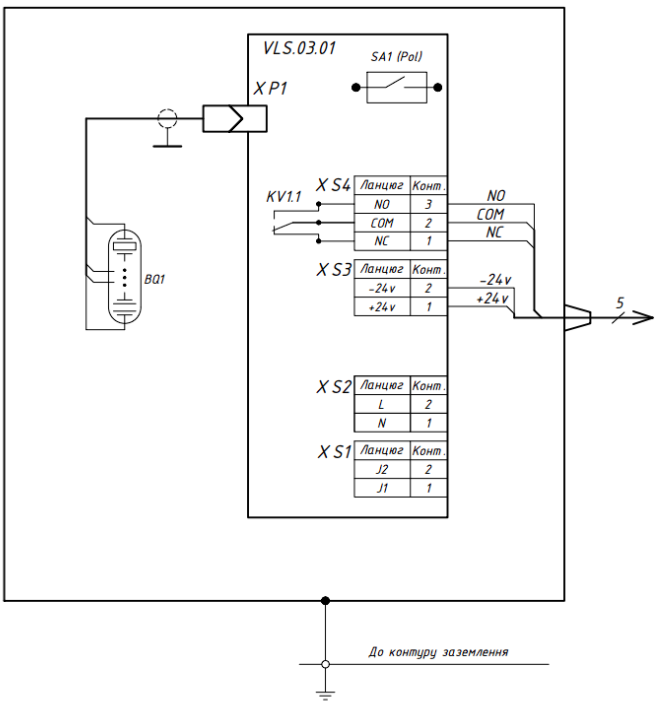


Рисунок 2.9 - Схема підключення Датчика, U жив =24V DC [15].

2.3.5. Функціональна схема камертонного сигналізатора рівня

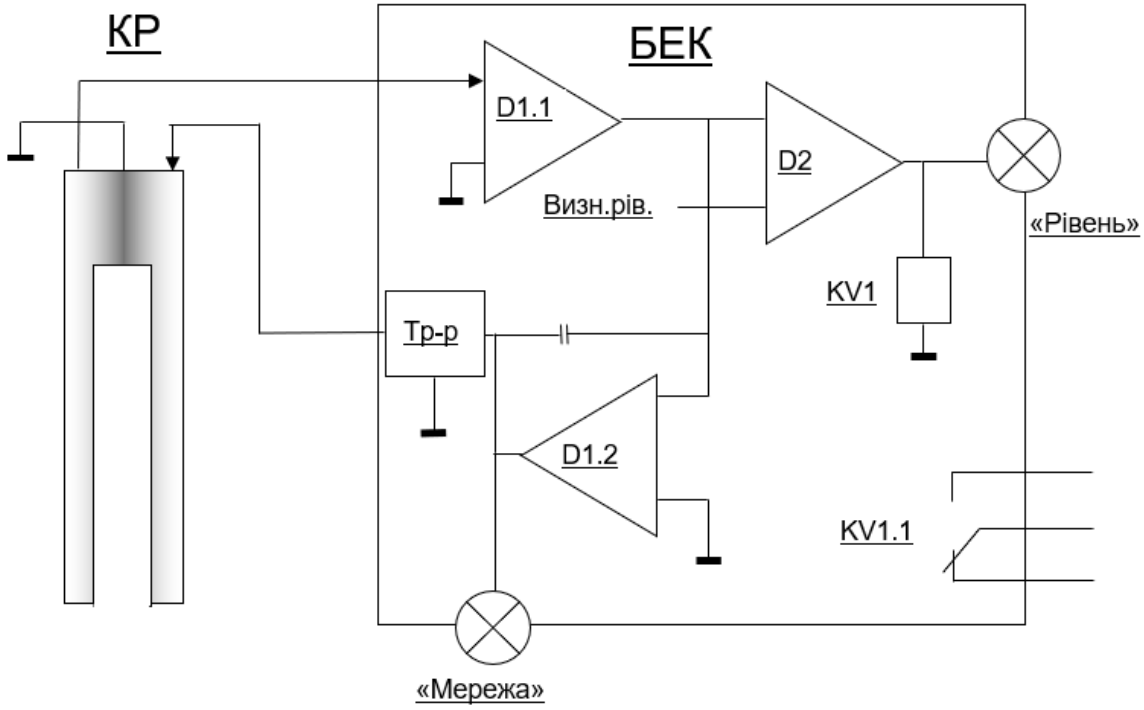


Рисунок 2.10 - Функціональна схема Датчика

Функціональну схему Датчика показано на рисунку 2.10. Блок електроніки камертонного резонатора (БЕК) призначений для збудження в камертонному резонаторі (КР) коливань гілок камертону з достатньою для вимірювання амплітудою. Функціонально БЕК є автогенератором з входом сигналу від однієї гілки камертону і виходом на іншу гілку. Перетворювачами механічних коливань камертону електричні сигнали для БЕК є п'єзоелементи з великим коефіцієнтом електромеханічного зв'язку.

Вхідний сигнал посилюється та фільтрується елементом D2. Фільтрування необхідне для збудження камертону на основній гармоніці резонансу. Після фільтра посилений сигнал надходить на трансформатор, що підвищує, і далі на другу гілку камертону. В результаті у вільному стані камертон починає вібрувати на власній резонансній частоті.

При цьому на вхід компаратора D1 надходить сигнал високого рівня, але в виході виходить сигнал низького. Реле KV знеструмлено, індикатор Рівень не світиться. Індикатор "Контроль" світиться.

При демпфуванні гілок камертону сипучим матеріалом або рідиною, на вході БЕК рівень сигналу зменшується, що призводить до спрацювання компаратора, на виході якого формується високий рівень напруги, що включає індикатор Рівень і реле KV1. Контакти реле перекидаються, керуючи вторинними механізмами.

При визволенні гілок камертону від матеріалу процес повторюється. (Камертон починає вібрувати, індикатор «Рівень» гасне).

Підбором опорного рівня компаратора можна регулювати чутливість пристрою (що необхідно для надійного спрацьовування при низкій щільності матеріалу) [16].

2.4. Вибір та аналіз блоків для автоматизованої системи керування

Перетворювачі частоти. Siemens SINAMICS G120P (рисунок 2.11) – це серія перетворювачів частоти змінного струму, розроблена компанією Siemens. Вона призначена для управління та контролю електричних двигунів у різних промислових додатках.

Перетворювачі частоти SINAMICS G120P мають такі особливості та можливості: підтримує керування різними типами електричних двигунів, включаючи асинхронні, синхронні та постійного моменту двигуни (PM-мотори). G120P має вбудовані інтерфейси, підтримує різні протоколи зв'язку, що дозволяє інтегрувати перетворювачі у системи автоматизації та контролю. Вони можуть взаємодіяти з контролерами, SCADA-системами та іншими пристроями, забезпечуючи зв'язність та передачу даних.

Рисунок 2.11 – Частотний перетворювач Siemens SINAMICS G120P

Характеристики Siemens SINAMICS G120P представлені нижче:

— Потужність: 7.5 кВт
— Число фаз/напруга на вході: 3-ф/380 В
— Число фаз/напруга на виході: 3-ф/380 В
— Струм номінальний: 18.00 А
— Вбудований регулятор: ПІД
— Скалярний режим керування
— Векторний режим керування без енкодера
— Векторний режим керування з енкодером [17]

Програмований логічний контролер. Для сигналізаторів рівня підійде будь-який контролер з дискретними входами, наприклад mitsubishi electric FX5U-64M з 32 дискретними входами (рисунок 2.12).

Рисунок 2.12 – ПЛК Mitsubishi Electric - FX5U-64M

Mitsubishi Electric FX5U-64M є контролером логічного програмування із серії FX5U, розробленої компанією Mitsubishi Electric. Цей контролер призначений для автоматизації та управління різними промисловими процесами та системами.

FX5U-64M оснащений високопродуктивним 32-бітним процесором, який забезпечує швидку та ефективну обробку програм та даних. Контролер має вбудовані цифрові та аналогові входи/виходи. FX5U-64M володіє 36 цифровими входами та 28 цифровими виходами, а також 4 аналоговими входами та 2 аналоговими виходами.

Він має вбудовану пам'ять для зберігання програм і даних. FX5U-64M має 64 Кб оперативної пам'яті (RAM) та 64 Мбіт (8 Мбайт) флеш-пам'яті для програм та збереження даних. Контролер підтримує різні комунікаційні інтерфейси для зв'язку з іншими пристроями та системами. Це включає Ethernet інтерфейс для підключення до мережі, а також порти для підключення серійних пристроїв та інших промислових шин зв'язку.

FX5U-64M підтримує різні мови програмування, включаючи логічне програмування (LD), функціональні блоки (FB) та текстову мову програмування (з використанням GX Works3 або інших інструментів програмування Mitsubishi Electric).

Контролер може бути розширений шляхом підключення додаткових модулів розширення вводу/виводу (I/O) або спеціалізованих модулів для підтримки специфічних функцій та інтерфейсів [18].

Повторювач інтерфейсу послідовних сигналів. Повторювач інтерфейсу ICP CON I-7510 (рисунок 2.13) - це компактний пристрій, який призначений для посилення та розширення дальності передачі даних RS-485.

Рисунок 2.13 – Повторювач інтерфейсу послідовних сигналів ICP CON I-7510

I-7510 може працювати як одиночний повторювач (1:1) або як повторювач зі схемою "зірка" (1:N). У режимі "зірка" він може посилити і розширити дальність передачі даних RS-485, дозволяючи підключати кілька пристроїв RS-485 до одного повторювача.

Повторювач I-7510 може значно збільшити дальність передачі даних RS-485. Зазвичай він здатний забезпечити надійний зв'язок на відстань до 1200 метрів, залежно від умов довкілля та якості кабелю. I-7510 підтримує стандартні швидкості передачі даних RS-485, включаючи від 300 біт/с - 115200 біт/с. Повторювач забезпечує захист від перешкод та шумів.

I-7510 живиться від зовнішнього джерела живлення, зазвичай від напруги 10-30 В постійного струму [19].

Комутатор мережі. Dell Networking X4012 10GbE (рисунок 2.14) є комутатором мережі (switch) виробництва компанії Dell. Він призначений для створення високошвидкісних мереж Ethernet і підтримує передачу даних зі

швидкістю 10 Гбіт/с. У деяких моделях можуть бути передбачені додаткові порти для керування або інших цілей.

Комутатор підтримує різні методи керування, включаючи керування через веб-інтерфейс (Web GUI), інтерфейс командного рядка (CLI) та можливість керування за допомогою протоколів мережного керування, таких як SNMP.

Dell Networking X4012 10GbE включає функції безпеки, такі як контроль доступу на основі портів і адрес MAC, шифрування даних, протоколи автентифікації та інші механізми захисту.

У деяких моделях комутатора можуть бути передбачені можливості базової маршрутизації, що дозволяють передавати дані між різними VLAN чи мережами.

Підтримка стандартів: Dell Networking X4012 10GbE відповідає різним мережевим стандартам, включаючи IEEE 802.3 (Ethernet), IEEE 802.1Q (VLAN) та інші.

Рисунок 2.14 – Комутатор Dell Networking X4012 10GbE [20]

Для управління протікаючими процесами на зерносховищах та виробництвах бетону використовують SKADA-системи.

Наприклад, SKADA-системи на зернових елеваторах (рисунок 2.15) та на комбікормових виробництвах управляє та контролює різні процеси, пов'язані зі зберіганням, переміщенням та обробкою зерна. Ці процеси можуть включати наступні операції:

Контроль рух зерна на різних етапах – від приймання зерна до його відвантаження. Це може включати контроль конвеєрних систем, силосів, бункерів та інших пристроїв для транспортування і зберігання зерна. Саме для цього використовуються сигналізатори рівня.

Управління процесом сушіння зерна: SKADA-система контролює процес сушіння зерна. Це може включати контроль параметрів сушильного обладнання, таких як температура, вологість і швидкість повітря.

Управління процесом очищення зерна від домішок, таких як пил, бур'яни та інші сторонні матеріали. Це може включати контроль працездатності сепараторів та інших очисних пристроїв.

Також SKADA-система забезпечує моніторинг та контроль за безпекою на елеваторі та комбікормовому виробництві, включаючи контроль температури, вологості та рівня, щоб запобігти можливим аваріям та псування продукту. Вона може керувати та контролювати різні аспекти виробничої лінії, такі як дозування та змішування інгредієнтів, контроль якості, управління технологічними параметрами тощо.

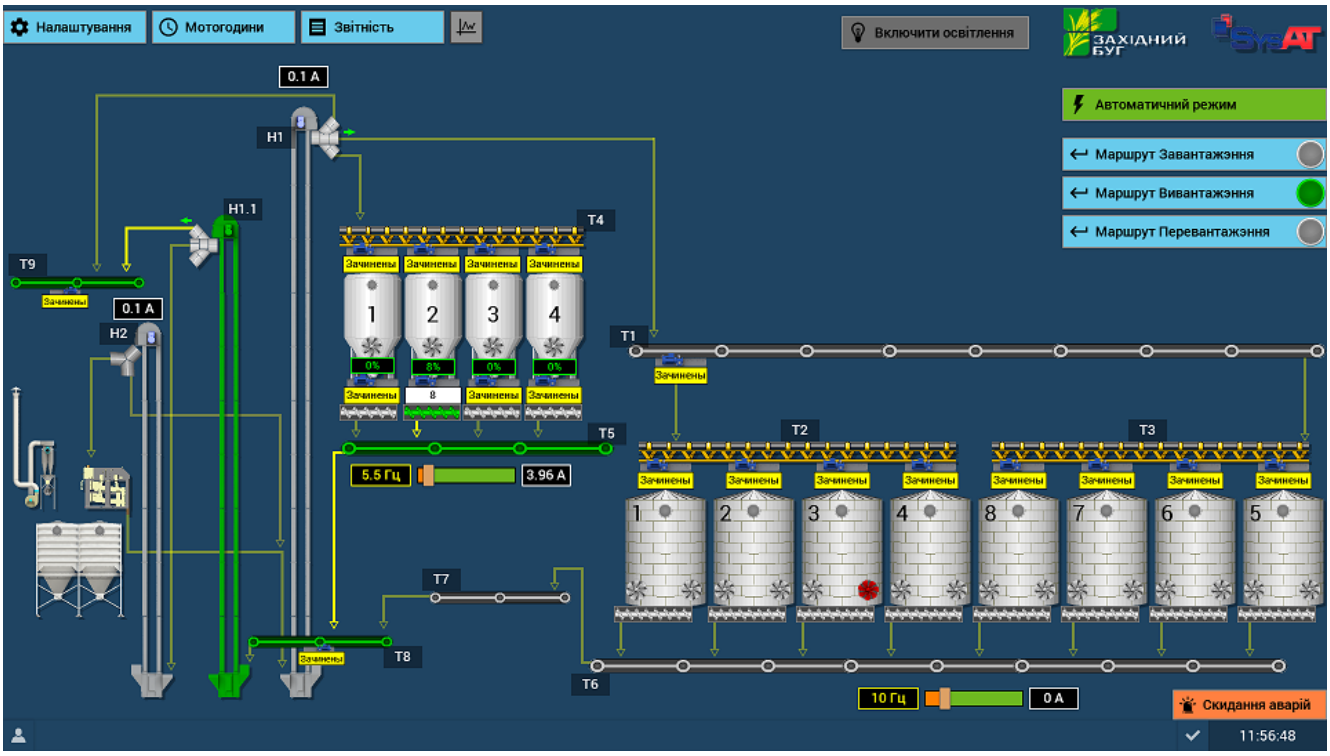


Рисунок 2.15 – SCADA-система елеваторної компаній «Західний Буг»

SCADA-система виконана у TIA Portal, в яку інтегровані програмні пакети Simatic WinCC. Simatic WinCC – це програмне забезпечення для візуалізації та нагляду за процесами в автоматизованих системах. Воно розроблено компанією Siemens і використовується в промисловості для створення графічних інтерфейсів оператора (HMI – Human-Machine Interface) та системи SCADA.

Simatic WinCC надає засоби для створення графічних елементів, таких як екранні об'єкти, кнопки, графіки, таблиці, тренди та інші елементи інтерфейсу, які дозволяють операторам моніторити та керувати процесами у реальному часі. Він також дозволяє візуалізувати дані, що отримуються з різних пристроїв та систем, та надає інструменти для аналізу та архівування даних.

Структура АСК ТП може відрізнятися залежно від конкретного застосування та вимог. Однак, вищеописані компоненти є основними та часто зустрічаються у різних реалізаціях АСК ТП [21].

Так, наприклад, виглядає вікно візуалізація SCADA-системи виробництва бетону (рисунок 2.16), завданням АСК ТП якої є виробництво бетону залежно від визначеного рецепту.

Коротко процес виробництва виглядає так: пісок та щебінь заданої кількості подаються в скіп, шляхом відкривання клапанів. Скіп переміщує суху суміш у змішувальний бункер. Цемент подається по шнеку в бункер, а потім залежно від заданого рівня подається у змішувальний бункер, шляхом відкривання клапана. Майже готова продукція змішується протягом визначеного часу залежно від заданого рецепту. Далі готова суміш передається у наступний бункер для подальшого фасування, шляхом відкриття дозувального клапана.

Після передачі готової суміші, у змішувальний бункер одразу подається цемент та суха суміш, що забезпечує безперервний процес роботи. Із останнього бункера готова суміш подається у фасувальні пакети, шляхом відкривання дозувального клапана.

Подача суміші відбувається за сигналом з кнопкового посту, який знаходиться поряд з фасуванням. Кількість суміші, що подається, визначається оператором.

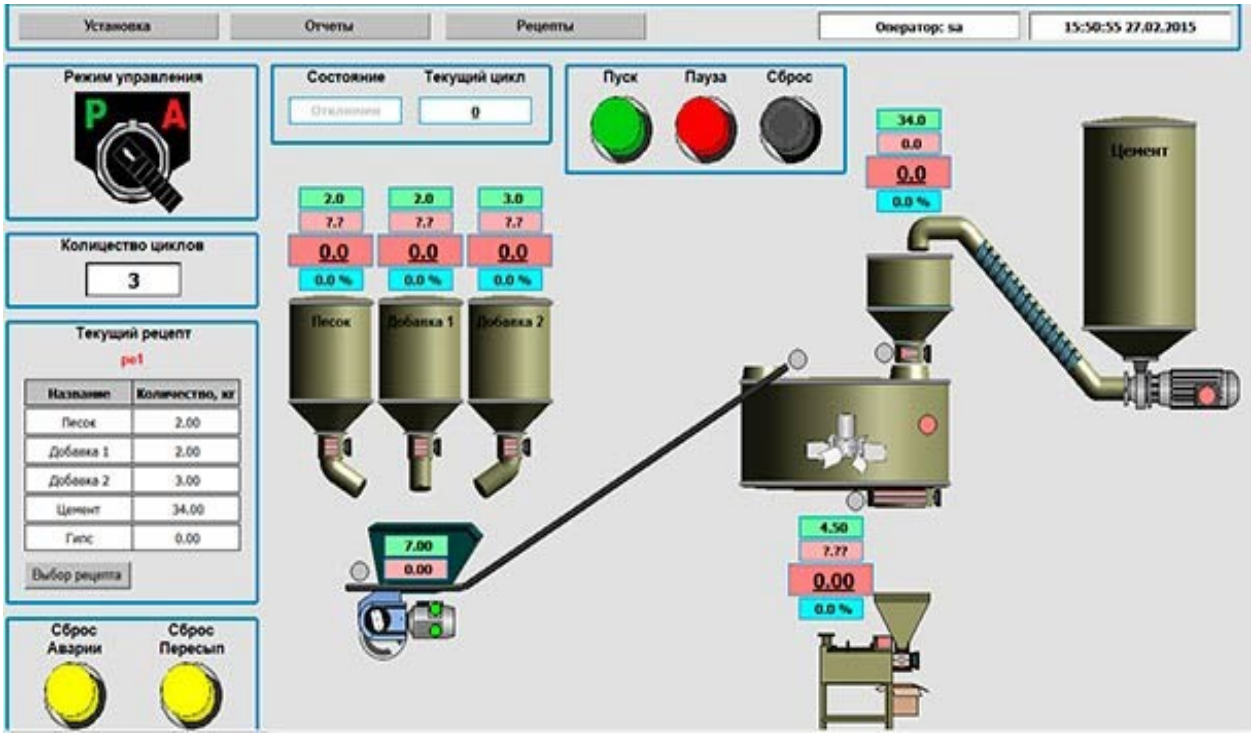


Рисунок 2.16 – SCADA-система для керування виробництва бетону [22]

2.5 Висновки до розділу II

1. Запропонована структура АСК узагальненого виробництва сипких сумішей та представлена функціональна п'ятирівнева схема, яка є гнучкою та такою, що легко адаптується до особливостей окремого виробництва.
2. На прикладі конвеєрної лінії, що використовується для завантаження сипкого продукту в бункер, показаний алгоритм взаємодії датчиків граничних рівнів з SCADA-системою. Особливо продемонстровано як при досягненні граничного рівня завантаження, що визначено датчиком рівня, SCADA-система активує та відключає процес завантаження бункера, запобігаючи його переповненню.
3. Запропоновано застосовувати активні вібраційні датчики (індикатори) граничного рівня для периферійного рівня (нижнього рівня керування) як прості, не вибагливі та надійні. Загальний опис функціональної блок-схеми вібраційного датчика та конструкції, принципу роботи, технічні характеристики, зовнішній вигляд, а також порядок монтажу та підключення є детальною настановою необхідною проектантам та користувачам.
4. Представленні матеріали результатів пошуку, вибору, порівнянь та обґрунтування комплектуючих для АСК, як необхідних для контролю технологічного процесу виробництва сипких сумішей, що входять до складу контрольно-вимірювальної системи другого та третього рівнів, є детальною настановою необхідною проектантам апаратури другого та третього рівнів керування.
5. Представлений опис розробки та призначення і можливостей середовища на прикладі застосування SCADA-системи в елеваторній компанії та виробництві бетону, що є узагальненим прикладом інтерфейсу системи четвертого рівня керування.

РОЗДІЛ ІІІ. КОСТРУКТОРСЬКІ ТА СХЕМОТЕХНІЧНІ І АЛГОРИТМІЧНІ РІШЕННЯ, МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ, ЩО РЕЛІЗОВУВАТИМУТЬ РОБОТУ ВІБРАЦІЙНОГО ДАТЧИКА ГРАНИЧНОГО РІВНЯ В АСК ПЕРЕРОБНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ РІЗНИХ ГАЛУЗЕЙ

3.1 Загальна архітектура та електрична принципова схема

Для побудови принципової електричної схеми пристрою було використано P-CAD. P-CAD - є програмне забезпечення для проектування електронних друкованих плат. P-CAD надає інструменти та функціональність, необхідні для розробки та створення електричних схем, проектування компонентів та трасування.

Принципова електрична схема електронного блоку виглядає так (рисунок 3.1):

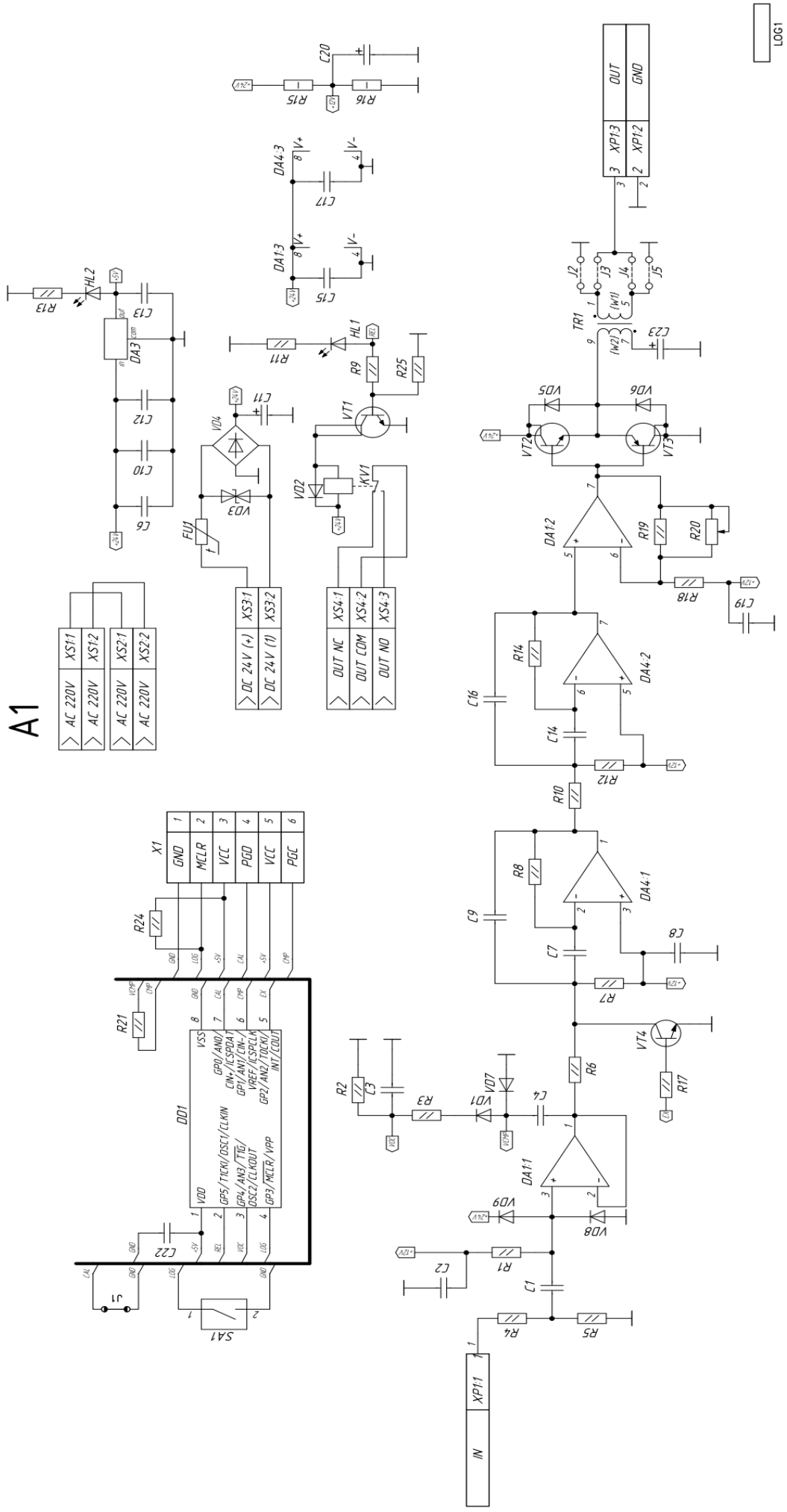


Рисунок 3.1 – Принципова електрична схема електронного блоку

3.2 Опис та обґрунтування компонентів електронного блоку сигналізатора рівня

Блок мікроконтролеру. У сигналізаторі рівня використовується мікросхема PIC12F1822-I/SN (рисунок 3.2), яка відноситься до сімейства мікроконтролерів PIC (Peripheral Interface Controller) компанії Microchip Technology. Це невеликий, низькопотужний мікроконтролер, призначений для широкого спектру додатків, що потребують малого розміру та низького енергоспоживання.

Рисунок 3.2 – Мікроконтролер PIC12F1822-I/SN

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики мікросхеми PIC12F1822-I/SN.

Архітектура:	Мікросхема базується на 8-розрядній архітектурі PIC з ядром PIC16 із RISC-процесором.
Частота роботи:	Мікросхема підтримує роботу із частотою до 32 МГц.
Кількість та тип пам'яті:	Вона оснащена 3,5 Кб флеш-пам'яті для програм, 128 байт ОЗП та 256 байт EEPROM для зберігання даних.
Вбудовані периферійні пристрої:	PIC12F1822-I/SN має різні периферійні пристрої, включаючи аналогово-цифровий перетворювач (ADC) з 10-бітною роздільною здатністю, лічильники/таймери, UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) для послідовної комунікації, порти введення/виводу (GPIO), ШІМ-генератор та інші.

Закінчення таблиці 3.1

Кількість та тип виходів:	Мікросхема має 8 ніжок у пластиковому корпусі типу SOIC (Small Outline Integrated Circuit), що забезпечує простоту монтажу на друкованій платі.
Напруга живлення:	Вона може працювати від напруги живлення в діапазоні від 2,3 до 5,5 В.
Енергоспоживання:	Мікросхема має низьке енергоспоживання та підтримує режими сну для економії енергії.
Програмування та налагодження:	Мікросхему можна програмувати за допомогою спеціального програматора, який підтримує протокол ICSP (In-Circuit Serial Programming). Також доступні різні засоби налагодження та програмування, що надаються компанією Microchip.

Основною причиною, через яку було обрано мікроконтролер PIC, це надійність і стабільність. Вони відомі своєю надійністю та стабільністю роботи, пройшли безліч тестів та мають довгу історію успішного застосування у різних промислових секторах. При цьому, мікроконтролер PIC має просту і зрозумілу асемблерну мову і добре документований, що спрощує процес розробки приладів під його керуванням.

Також, не мало важливим є режим сну мікроконтролера, який тимчасово відключає периферійні пристрої, що не використовуються, і модулі, такі як таймери, аналогові схеми і комунікаційні інтерфейси. Це дозволяє заощаджувати ресурс і скорочувати їх знос, що особливо важливо для приладів з тривалим терміном служби коли вони перебувають у режимі очікування, наприклад при завантаженому стані ємності з сипучим матеріалом [23].

Лінійний стабілізатор напруги. Мікросхеми L78M05CDT (рисунок 3.3) є лінійними стабілізаторами напруги типу позитивний регулятор. Вони є малогабаритні пристрої, призначені для підтримки стабільної вихідної напруги на заданому рівні.

Рисунок 3.3 – Лінійний стабілізатор напруги L78M05CDT

Таблиця 3.2 – Основні характеристики мікросхеми L78M05CDT.

Напруга стабілізації:	L78M05CDT є стабілізатором напруги з фіксованою вихідною напругою. В даному випадку це +5 Вольт.
Струм навантаження:	Максимальний струм навантаження (струм, який можна споживати на виході стабілізатора) становить 500 мА.
Вхідна напруга:	Діапазон вхідної напруги для L78M05CDT становить від 7 до 35 В. Це означає, що напруга, що подається на вхід стабілізатора, повинна бути в межах зазначеного діапазону.
Теплове відведення:	Мікросхема L78M05CDT має зовнішнє теплове відведення (TO-220), яке допомагає відводити тепло від стабілізатора, забезпечуючи його більш ефективне охолодження.
Захисні функції:	L78M05CDT має захист від перевантаження та короткого замикання. Це допомагає запобігти пошкодженню мікросхеми при виникненні таких ситуацій.
Низький рівень пульсацій:	Мікросхеми L78M05CDT добре підходять для усунення пульсацій та шумів на вході та забезпечують стабільну та чисту вихідну напругу.

L78M05CDT є широко поширеною мікросхемою, яка знаходить застосування у багатьох електронних пристроях, що потребують стабільного живлення на рівні +5 В, тобто такі як мікроконтролер PIC12F1822-I/SN. Мікроконтролери чутливі до напруги живлення. Нестабільна напруга може спричинити неправильну роботу мікроконтролера, помилки у обчисленнях і навіть пошкодження приладу. Стабілізатор напруги забезпечує постійну та стабільну напругу живлення, що гарантує надійну та коректну роботу мікроконтролера [24].

Операційний підсилювач. Мікросхема LM358ADT (рисунок 3.4) відноситься до сімейства операційних підсилювачів із двома операційними підсилювачами всередині одного корпусу. Операційні підсилювачі - це активні електронні пристрої, які використовуються для посилення та обробки аналогових сигналів.

Рисунок 3.4 – Операційний підсилювач LM358ADT

Таблиця 3.3 – Основні характеристики мікросхеми LM358ADT.

Двоканальний операційний підсилювач:	LM358ADT містить два незалежні операційні підсилювачі в одному корпусі. Це дозволяє використовувати мікросхему для виконання двох різних завдань посилення чи обробки сигналів.

Закінчення таблиці 3.3

Напруга живлення:	LM358ADT працює при напрузі живлення від однополярного джерела в діапазоні від 3 до 32 В. Це робить мікросхему сумісною з різними джерелами живлення.
Низьке споживання енергії:	Мікросхема LM358ADT має низьке споживання енергії, що робить її придатною для застосування в батарейних та інших енергоефективних пристроях.
Широкий діапазон робочих температур:	LM358ADT може працювати у широкому діапазоні робочих температур від -40 °C до +105 °C, що робить її придатною для використання у різних кліматичних умовах.
Високий коефіцієнт посилення:	Мікросхема LM358ADT має високий коефіцієнт посилення, що дозволяє їй посилювати слабкі аналогові сигнали з високою точністю і низьким рівнем спотворень.
Низький рівень шуму:	LM358ADT має низький рівень шуму, що дозволяє використовувати мікросхему для чутливих аналогових програм, де потрібна висока точність сигналу.

Мікросхема LM358ADT широко використовується у різних електронних приладах, таких як підсилювачі сигналів. В електричній схемі сигналізатора рівня їх використовується 2 штуки: сигнал, який отримується від п'єзоелектричного елемента, зазвичай дуже слабкий і вимагає посилення, щоб бути обробленим іншими електронними компонентами. У цьому місці операційний підсилювач може бути використаний для посилення слабкого сигналу від датчика рівня, придатного для подальшої обробки.

Ще один операційний підсилювач використовується для збудження резонатора і фільтрації сигналу. Фільтрування необхідне для збудження камертону на основній гармоніці резонансу [25].

Позистор. Позистор FSMD050-2920-R (рисунок 3.5) - це SMD-позитор позистор з номінальною напругою 50 В (Surface Mount Device PTC Resistor) виробництва компанії Littelfuse.

Рисунок 3.5 – Позистор FSMD050-2920-R

Позистори застосовуються в ланцюгах захисту від перенапруги, щоб запобігти пошкодженню електронних компонентів від тимчасових перенапруг або імпульсних подій. Коли напруга ланцюга перевищує номінальне значення позистора, його опір різко зростає, обмежуючи струм і запобігаючи пошкодження інших компонентів [26].

DIP-перемикач. DIP-перемикач DS-01 (рисунок 3.6) відноситься до типу електронних компонентів, що використовуються для налаштування та встановлення певних параметрів у електронних пристроях. DIP означає Dual Inline Package, що визначає фізичну конфігурацію компонента - поруч розташованих контактів у корпусі.

Рисунок 3.6 – DIP-перемикач DS-01

У сигналізаторі рівня він використовується для перемикання режимів роботи датчика: залежності від вибраного режиму відбуватиметься замикання нормально замкнутої групи контактів або розмикання нормально розімкнутої групи контактів реле при контакті з сипучим продуктом [27].

Електромагнітне реле. Реле G6RN-1-24 (RM96-1011-35-1024) (рисунок 3.7) є електромеханічним пристроєм, що використовується для керування електричними ланцюгами та комутації навантажень. Воно має навантаження контакту AC (при активному навантаженні) 8A/250B AC та навантаження контакту DC (при активному навантаженні) 8A/24B DC.

Рисунок 3.7 – Електромагнітне реле G6RN-1-24 [28]

AC/DC-перетворювач. AC/DC-перетворювач IRM-05-24 (S) (рисунок 3.8) - це електронний пристрій, призначений для перетворення змінного струму (AC) на постійний струм (DC). IRM-05-24 (S) зазвичай приймає вхідну напругу змінного струму (AC) у діапазоні, що відповідає його специфікації. Модель IRM-05-24 може приймати вхідну напругу AC в діапазоні 85-264 В та забезпечувати вихідну напругу постійного струму (DC) 24 В. IRM-05-24 (S) має певну межу вихідного струму, яку може надати, а саме струм 0.21 А (210 мА) [29].

Рисунок 3.8 – AC/DC-перетворювач IRM-05-24 (S)

У сигналізаторі рівня він використовується з метою підключення приладу до джерела живлення 220В.

Трансформатор. Трансформатор TEZ1.5/d230/9-9v (рисунок 3.9) призначений для використання на друкованих платах у системах живлення електронного обладнання. Він відрізняється компактними розмірами, має компактну конструкцію, яка захищена залитою смолою, і має підвищену стійкість до механічних та кліматичних впливів.

Рисунок 3.9 – Трансформатор TEZ1.5/d230/9-9v

В електричній схемі сигналізатора він використовується для підвищення живлення з 8V DC до 240-295V AC, так як п'єзоелементи вимагають більшої потужності для своєї роботи, а напруга збудження п'єзокерамічного кільця лежить в діапазоні між 240 і 295V AC [30].

Діодний міст. Діодний міст DF06M (рисунок 3.10) - це електронний компонент, який є пристроєм, що складається з чотирьох діодів, з'єднаних в мостову конфігурацію. Він забезпечує односпрямоване проведення струму та зворотну полярність для ефективної роботи сигналізатора.

Рисунок 3.10 – Діодний міст DF06M [31]

П'єзоелектричний елемент. П'єзокерамічне кільце PZT4 (рисунок 3.11) (піроелектричний цирконат-титанат співвідношення 65:35) кільце з розмірами ОД (зовнішній діаметр) 10 мм, ID (внутрішній діаметр) 5 мм та товщиною 2 мм є конкретним типом PZT матеріалу.

PZT4 є одним із типів піроелектричних матеріалів, що містять цирконат-титанат. Цей матеріал має хороші п'єзоелектричні властивості, тобто він може перетворювати механічну енергію в електричну і навпаки [32].

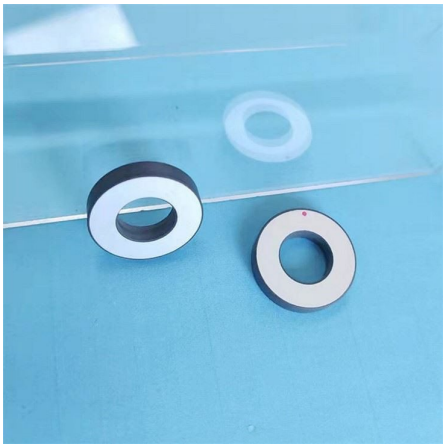


Рисунок 3.11 – П'єзокерамічне кільце PZT4

Таблиця 3.4 – Характеристики п'єзокерамічного кільця PZT4 (умова тесту: 23±3°C, 40 ~ 70% відносної вологості).

Резонансна частота fr:	142 KHz±4 кГц
Коефіцієнт ефективного електромеханічного зв'язку (k_{eff}):	≥35%

Закінчення таблиці 3.4

Резонансний режим:	Радіальний режим імпедансу аналізатора.
Резонансний опір Zm:	≤20 Ω
Статична ємність Cs:	350pF±15%@1kHz

3.2 Моделювання роботи п'єзокерамічного резонатора

У п'єзокерамічному резонаторі (п'єзокерамічному кільці або диску) при впливі на його електроди гармонійного змінного електричного поля з частотою, близькою до його резонансної частоти, виникає механічна деформація, що стрімкоподібно зростає.

Кільцева форма дозволяє п'єзокерамічним елементом мати стабільні резонансні властивості. Залежність від частоти, амплітуди та фази коливань може бути ретельно налаштована шляхом правильного вибору геометрії та розмірів кільця. Це особливо корисно в пристроях, де потрібен точний контроль над резонансними характеристиками, наприклад, в ультразвукових або вібраційних перетворювачах.

Таким чином, резонанс у п'єзокерамічному резонаторі включає явища як електричні, так і механічні. Як показано на рисунку 3.12, п'єзокерамічний диск є тонким круглим диском діаметром D (= 2a) і товщиною t, верхня і нижня поверхні якого повністю покриті електродами, а вісь поляризації проходить вздовж напрямку товщини.

Вісь координат $x3$ встановлена перпендикулярно до кругових поверхонь, на яких вимірюються r і θ. Електричне поле, яке накладається, однорідне і має однакову інтенсивність в напрямку розповсюдження акустичної хвилі. У нетривіальній граничній умові для плоского радіального режиму пружне напруження (механічне напруження) Trr дорівнює 0 при r = a, а рівняння руху для переміщення ur є рівнянням Бесселя.

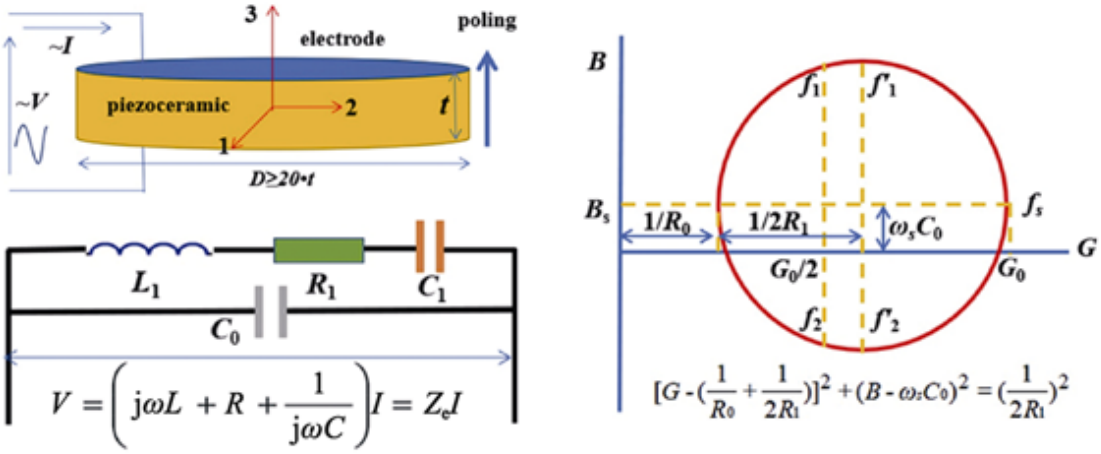


Рисунок 3.12 – П'єзокерамічний диск та його електричні властивості

Коли синусоїдальна напруга (V) прикладається до п’єзоелектричного керамічного резонатора, струм (I) також є синусоїдальним з тією ж циклічною частотою (ω). Електрична комплексна провідність (Y) резонатора має вигляд [33]:

$$Y = \frac{I}{V} = j\omega \frac{\pi a^2}{t} \varepsilon_{33}^{T}\left(1 - k_p^2\right)$$

$$\left\{1 + \frac{k_p^2}{1-k_p^2} * \frac{(1+\sigma^E)J_1(\eta)}{\eta J_0(\eta) - (1-\sigma^E)J_1(\eta)}\right\} \quad (3.1)$$

де t — товщина диска;

a — радіус;

ω — задаюча частота;

ε_{33}^{T} — безнапружена діелектрична проникність у $x3$-напрямку, виміряна на низькій частоті ($\varepsilon_{33}^{T}\pi a^2 / t = c_{33}^{T}$);

k_p — коефіцієнт електромеханічного зв’язку;

σ^E — коефіцієнт Пуассона;

J_0 і J_1 — функції Бесселя першого роду, нульового та першого порядку відповідно, підпорядкованих співвідношенню $J_1(z) = zJ_0(z)/J_1(z)$ [34].

η є добутком хвильового вектора ξ і питомого розміру резонатора a, який називається безрозмірним хвильовим числом.

У резонансі резонатор без втрат має нескінченно високу провідність (Y→∞), а η задовольняє таке трансцендентне рівняння:

$$\eta_r \frac{J_0(\eta_r)}{J_1(\eta_r)} = 1 - \sigma^E \quad (3.2)$$

а при антирезонансі (*Y = 0*) маємо

$$\eta_r \frac{J_0(\eta_r)}{J_1(\eta_r)} = 1 - \sigma^E - \frac{k_p^2}{1-k_p^2}(1 + \sigma^E) \quad (3.3)$$

η_r можна обчислити чисельно за рівнянням (3.2) для заданого σ^E, використовуючи відоме ηr і відношення хвильових чисел $(\eta_a/\eta_r = f_a/f_r)$,

k_p можна обчислити з трансцендентного рівняння (3.3) як:

$$k_p^2 = \frac{(1-\sigma^E)J_1(\eta_a) - \eta_a J_0(\eta_a)}{2J_1(\eta_a) - \eta_a J_0(\eta_a)} \quad (3.4)$$

Для заданого σ^E плоский модуль пружності c_{11}^pі пружну податливість S_{11}^E можна розрахувати наступним чином:

$$C_{11}^p = \frac{4\pi^2 f_r r^2 p}{\eta_r} \quad (3.5)$$

$$s_{11}^E = \frac{1}{C_{11}^p(1-(\sigma^E)^2)} \quad (3.6)$$

Комбінація ε_{33}^T, s_{11}^E, σ^E і k_p може дати нам поперечну п’єзоелектричну постійну d31:

$$d_{31} = k_p \sqrt{\varepsilon_{33}^T S_{11}^E \frac{1-\sigma^E}{2}} \quad (3.7)$$

З іншого боку, коефіцієнт ефективного електромеханічного зв'язку keff можна додатково виразити через співвідношення резонансної та антирезонансної частоти. Однак через трансцендентні рівняння для резонансу та антирезонансу k_p має дуже складний зв’язок із k_{eff}, а їхнє співвідношення k_p/k_{eff} є функцією σ^E(зазвичай коливається від 1,12 до 1,15) [33].

Визначення резонансних частот для круглого зразка диска показано на рисунку 3.13. Електрична провідність Y є складною функцією від ω (рисунок 3.13(а)), чия дійсна та уявна частини є провідністю G (рисунок 3.13(б)) і чутливість B (рисунок 3.13(с)) відповідно (тобто Y = G + iB). Порядок зростання f_m (228,72 кГц) < f_s (228,843 кГц) < f_r (228,956 кГц) можна спостерігати з графіка (рисунок 3.13(г)), який відображає відносну варіацію між G і B.

Середня потужність, що надходить від джерело напруги та імпеданс, що

споживається, пропорційний провідності G. З цієї причини максимум G пов’язаний із послідовною резонансною частотою (fs), навіть у випадку режимів зв’язку. Для дискового вібратора планарна радіальна частотна константа N_p є добутком послідовної резонансної частоти на діаметр диска ($N_p = f_s \cdot D$). Розрахований коефіцієнт становить 2105 Гц·м для PZT п’єзокераміки.

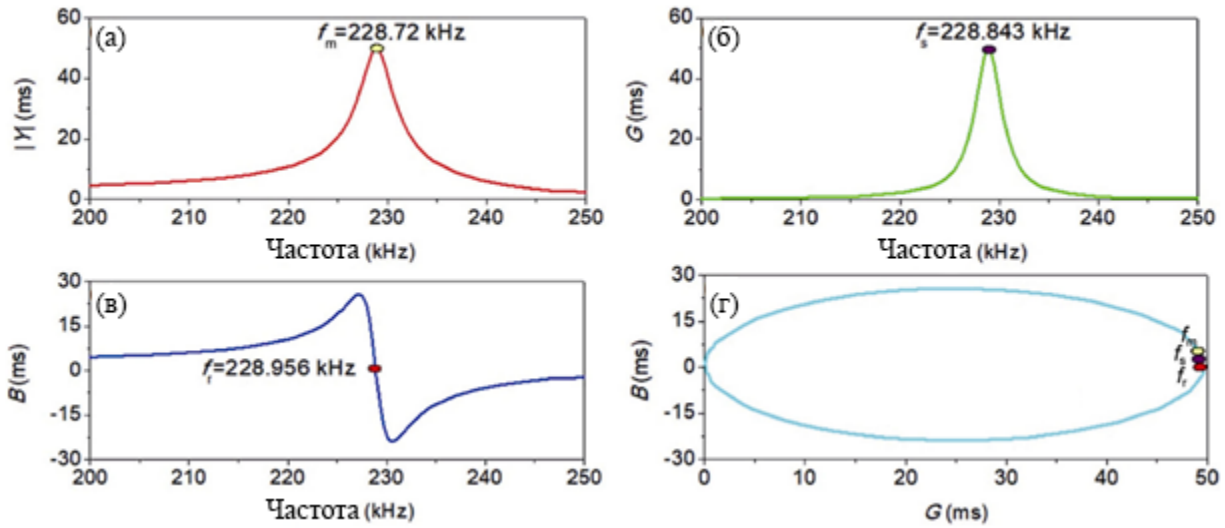


Рисунок 3.13 – Визначення резонансних частот для зразка круглого диска: (а) максимальний модуль адмітансу, (б) максимальна електрична провідність, (в) нульова сприйнятливість і (г) полярне представлення [35]

3.3 Знаходження власної частоти вібрації вилки

Зазвичай резонансна частота вилки є фіксованою та дорівнює власній частоті, коли п’єзоелектричний генератор коливань приводиться в дію у вакуумі.

Коли ж сипучий матеріал (або гази, рідини), рівень якого потрібно виміряти, проходить через вилку камертона, резонансна частота корпусу вилки змінюється.

Резонансна частота вилки пов'язана з ефективною масою вилки. Сипучий матеріал проходить через вилку і прикріплюється до неї, що змінює ефективну масу вилки, і, таким чином, резонансна частота вилки зміщується. Загальна залежність між частотою вібрації та щільністю матеріалу виглядає

наступним чином (застосовується для рідинноподібних матеріалів) [36]:

$$\rho = k_0 + k_1 f + k_2 f^2 \quad (3.8)$$

де ρ позначає густину сипучого матеріалу (рідини/газу), що підлягає вимірюванню,

f — вихідна частота датчика,

k_1, k_2 і k_3 — постійні коефіцієнти датчика, і вони пов’язані з основними властивостями матеріалу, що вимірюється і структури камертона.

Частина вилки датчика камертона безпосередньо контактує з вимірюваним продуктом, у цьому процесі відіграє роль конструкція вилки, впливаючи на власну частоту вилки, коли вона вібрує. Таким чином, оптимізація розмірів камертона має життєво важливий вплив на точність і стабільність даних вимірювань.

При роботі камертон фіксується на корпусі резонатора способом приварювання. Вібрація камертона генерується вібрацією скорочення та вібрацією вигину корпусу камертона. Видима частина корпусу камертона являє собою консольну балкову конструкцію [37]. Його частота вібрації залежить від матеріалу, довжини та товщини камертона. Диференціальне рівняння поперечного вільного коливального руху балки з моделі балки Ейлера–Бернуллі отримується як:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2}\left(EJ\frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2}\right) + \rho bc\frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} = 0 \quad (3.9)$$

де E — модуль пружності матеріалу вилки;

J — коефіцієнт перерізу вигину;

ρ — щільність матеріалу вилки;

b — ширина вилки;

c — товщина вилки;

y (x) – головна функція моди структури пучка;

β – характерні параметри форм моди.

Основа тіла вилки береться як кінець пружного зв'язку, а кінець тіла вилки береться як гранична умова. Для розв’язання задачі використано метод

роздільної змінної (також відомий як метод Фур'є).

Граничні умови на кінці пружного зв'язку (біля основи вилки):

$$\begin{cases} \left[\frac{\partial y(x,t)}{\partial x}\right]_{x=0} = 0, \\ \frac{\partial}{\partial x}\left[EJ\frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2}\right]_{x=0} = -ky(x,t). \end{cases} \quad (3.10)$$

Граничні умови на вільному кінці наступні (на кінці вилки):

$$\begin{cases} \left[EJ\frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2}\right]_{x=l} = 0, \\ \frac{\partial}{\partial x}\left[EJ\frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2}\right]_{x=0} = 0. \end{cases} \quad (3.11)$$

Рівняння є рівнянням руху класичної моделі балки Ейлера–Бернуллі.

Нарешті, зв'язок між власною частотою P_i (i-го порядку) вилки та відповідними параметрами вилки отримується таким чином:

$$P_i = \lambda_1^2\sqrt{\frac{EJ}{\rho bcl^4}} \quad (3.12)$$

де λ^2 пропорційна власній частоті p_i, а λ є функцією порядку моди вилки.

У рівнянні ідеальної консольної, балки, $\lambda_1 = 1.875$, $\lambda_2 = 4.694$, $\lambda_3 = 7.855$.

Вільне коливання камертона в повітрі подібне до вільного коливання консольної балки, закріпленої з одного боку. Загалом вільна вібрація корпусу вилки є власною частотою першого порядку. Якщо ввести λ_1 у рівняння (3.12), то можна обчислити власну частоту.

3.4 Вплив конструкції камертону на точність виміру.

Спрощена модель вібрації п'єзоелектричного камертона під дією зовнішньої сили вимірюваного матеріалу виглядає наступним чином:

$$F = m_g\frac{dv}{dt} + yv + k\int v\,dt \quad (3.13)$$

де F – сила досліджуваної рідини,

c – стала сили в'язкості,

v – відносна швидкість досліджуваної рідини,

m_g – ефективна маса консольної балки,

k – пружна стала камертона.

Як показано на рисунку 3.14, виміряний матеріал контактує з поверхнею вилки та прикріплюється до поверхні вилки, що призводить до зміни ефективної маси вилки в цілому, коли камертон вібрує вниз та вниз уздовж x-вісі. Наступний вміст буде проаналізовано двома різними контактними поверхнями та режимами дії рідини та камертона.

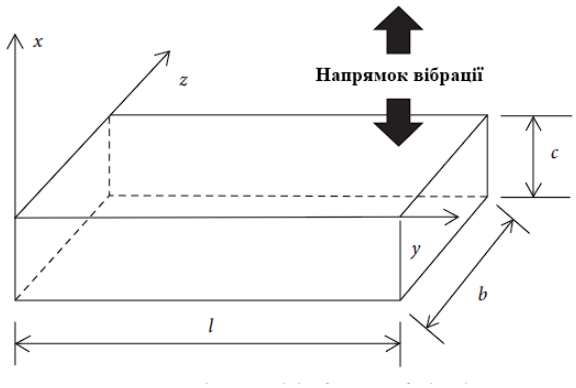


Рисунок 3.14 – Еквівалентна модель вібрації камертона.

Якщо не враховувати вплив площини зсуву в напрямку осі x на корпус камертона, то тільки площина l×c контактує та взаємодіє з вимірюваним матеріалом. Внаслідок впливу в'язкості та щільності матеріалу та зміни стану демпфування вилки, змінюється і сила з якою коливається вилка відповідно. За інерції ньютонівської рідини вплив маси рідини, що прилипає до вилки, еквівалентний силі, що діє на вилку. Тому, спрощена модель вібрації корпусу камертона під дією зовнішньої сили вимірюваного матеріалу виглядає наступним чином:

$$F = y\frac{dv}{dt} + \Delta m\frac{d^2y}{dt^2} \quad (3.15)$$

де Δm являє собою еквівалентну масу матеріалу, що прилипає до камертона, а y являє собою зміщення шару рідини.

Число Рейнольдса визначається як:

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho l^2 \omega}{\eta} \quad (3.16)$$

де η – в'язкість рідини,

l – довжина вилки, ω – резонансна частота камертона,

ρ – густина рідини.

Коли камертон знаходиться в ньютонівській рідині з високим числом Рейнольдса, і якщо він ігнорує вплив в'язкості рідини, ефективна маса Δm1 вимірюваної рідини, яка приєднана до корпусу камертона, може бути такою:

$$\Delta m_1 = 0.6 m_g \rho (lc)^{(3/2)} \quad (3.17)$$

де m_g – ефективна маса п'єзоелектричного камертона.

Коли розглядається лише вплив площини зсуву в напрямку осі x, площини b×c і l×c у корені вилки зрізають рідину. Вплив рідини на площу зсуву площини b×c є незначним через малу площу контакту з вимірюваною рідиною. Ефективна маса Δm2 досліджуваної рідини, приєднаної до корпусу камертона, виражається як:

$$\Delta m_2 = 2\left(\frac{\rho \eta \omega l C}{2}\right)^{(1/2)} \frac{A}{\omega} \quad (3.18)$$

де η – в'язкість досліджуваної рідини, а ω – частота коливань камертона в досліджуваній рідині.

Ефективну масу досліджуваної рідини, що прилипає до корпусу камертона, можна виразити рівняннями (3.17) і (3.18) наступним чином:

$$\Delta m = \Delta m_2 + \Delta m_1 = 2\left(\frac{\rho \eta \omega l C}{2}\right)^{(1/2)} \frac{A}{\omega} + 0.6 m_g \rho (lc)^{(3/2)} \quad (3.19)$$

де $\Delta m = \rho V_1$, а V_1 — об'єм рідини, прикріпленої до вилки, яка є функцією, пов'язаною з довжиною, шириною та товщиною вилки (l, c і b), пропорційною до V_1.

$m_g = \rho_1 lcb$, ρ1 – щільність матеріалу, з якого виготовлений камертон. Отже, з рівняння (3.18) можна отримати, що в досліджуваній рідині залежність між резонансною частотою та відповідними параметрами рідини та камертона є:

$$\omega = \frac{A\eta}{2\rho\left(V_1 + 0.6\rho_1 b (lc)^{(5/2)}\right)^2} \quad (3.20)$$

Якщо η і ρ залишаються незмінними, зменшуючи розміри вилки l, c і b, резонансна частота камертона зростає під впливом в'язкості, а кут нахилу кривої ω = f(n) у відповідній точці збільшується. Можна показати, що зменшення розмірів вилки призведе до зростання резонансної частоти камертона під впливом в'язкості η.

Якщо знехтувати впливом вимірюваної рідини на поверхню вилки, частота вібрації вилки без перешкод буде наступною:

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m_g}} \quad (3.21)$$

де k - константа, пов'язана з розмірами камертона.

Коли датчик щільності камертона працює в вимірюваній рідині, якщо загальна ефективна маса рідини, прикріпленої до корпусу вилки, дорівнює Δm, частота вібрації п’єзоелектричного камертона в вимірюваній рідині є наступною:

$$f' = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m_g+\Delta m}} \quad (3.22)$$

$$f' \approx f\left(1 - \frac{\Delta m}{2m_g}\right) \quad (3.23)$$

Роздільна здатність вимірювання частоти п'єзоелектричного камертона наступна:

$$\Delta f = f' - f = -\frac{f}{2m_g}\Delta m \quad (3.24)$$

Частотна роздільна здатність камертона має важливий вплив на результат вимірювання щільності. З рівняння (3.24) видно, що роздільна здатність вимірювання пов’язана з резонансною частотою вилки та ефективною масою рідини, прикріпленої до вилки.

Ефективна маса рідини набагато більша, ніж рідина, яка приєднана до вилки, тому ефективною масою приєднаної рідини можна знехтувати. Отже, чим менше ефективна маса вилки, тим вище роздільна здатність датчика і вище чутливість вимірювання. У поєднанні з рівняннями (3.20) і (3.24) існує конфлікт між роздільною здатністю вимірювання частоти камертона та здатністю антив’язкості до перешкод.

Хоча збільшення розмірів камертона може зменшити вплив в’язкості рідини на резонансну частоту камертона, це також зменшує резонансну частоту та роздільну здатність вимірювання частоти, зменшення розміру камертона призводить до зворотного результату. Таким чином,

співвідношення між роздільною здатністю вимірювання частоти збалансованого камертона та можливістю антив'язкості є ключовим для покращення загальної продуктивності вимірювання датчика щільності камертона.

У наступній частині буде досліджено взаємозв'язок між розміром камертона та роздільною здатністю вимірювання частоти та здатністю камертона до антив'язкості в поєднанні з експериментом моделювання, щоб покращити розміри камертона і покращити загальну продуктивність вимірювання датчика щільності камертона за допомогою експерименту з моделюванням [38; 39].

3.5 Модальний аналіз резонансу камертона.

Аналіз результатів моделювання процесу резонансу, визначення власної частоту камертона було виконано за допомогою COMSOL. COMSOL - це програмне забезпечення для моделювання та аналізу мультифізичних завдань. Воно дозволяє створювати віртуальні прототипи реальних систем та вивчати їхню поведінку за різних умов.

Власні частоти мод, перших шести порядків, отримані модальним аналізом COMSOL для перевірки розрахунку власних частот вібрації вилки.

Два види п'єзоелектричного експериментального камертону, побудованого у програмі Solidwork, для 3D моделювання процесу розрахунку власних частот вібрації вилки камертону у програмі COMSOL показано на рисунку 3.15.

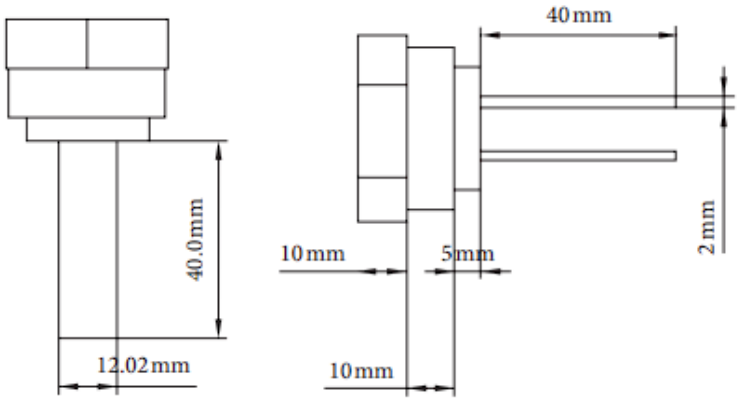


Рисунок 3.15 – Експериментальна модель камертону.

Площа поперечного перерізу моделі вилки 12 × 2 мм2, довжина 40 мм. Документ проекту конструкції імпортується в COMSOL, як фізичне поле вибирається механіка твердого тіла, а як об'єкт дослідження вибирається характерна частота та форма моди. Матеріалом обрана нержавіюча сталь AISI304. Щільність параметрів матеріалу 7930 кг/м3, модуль пружності 200 ГПа, коефіцієнт Пуассона 0,3. Моделювання починається після ряду попередніх обробок, таких як побудова сітки та застосування обмежень [40].

Чим нижчий порядок, тим легше відбувається збудження і тим менше потрібна енергія. Це пов'язано з енергією збудження, що передається п'єзокерамічним генератором коливань. У практичних вимірюваннях і експериментах режим вібрації камертона є першим порядком. Шаблони вібрації вилки в різних режимах показані на рисунку 3.16.

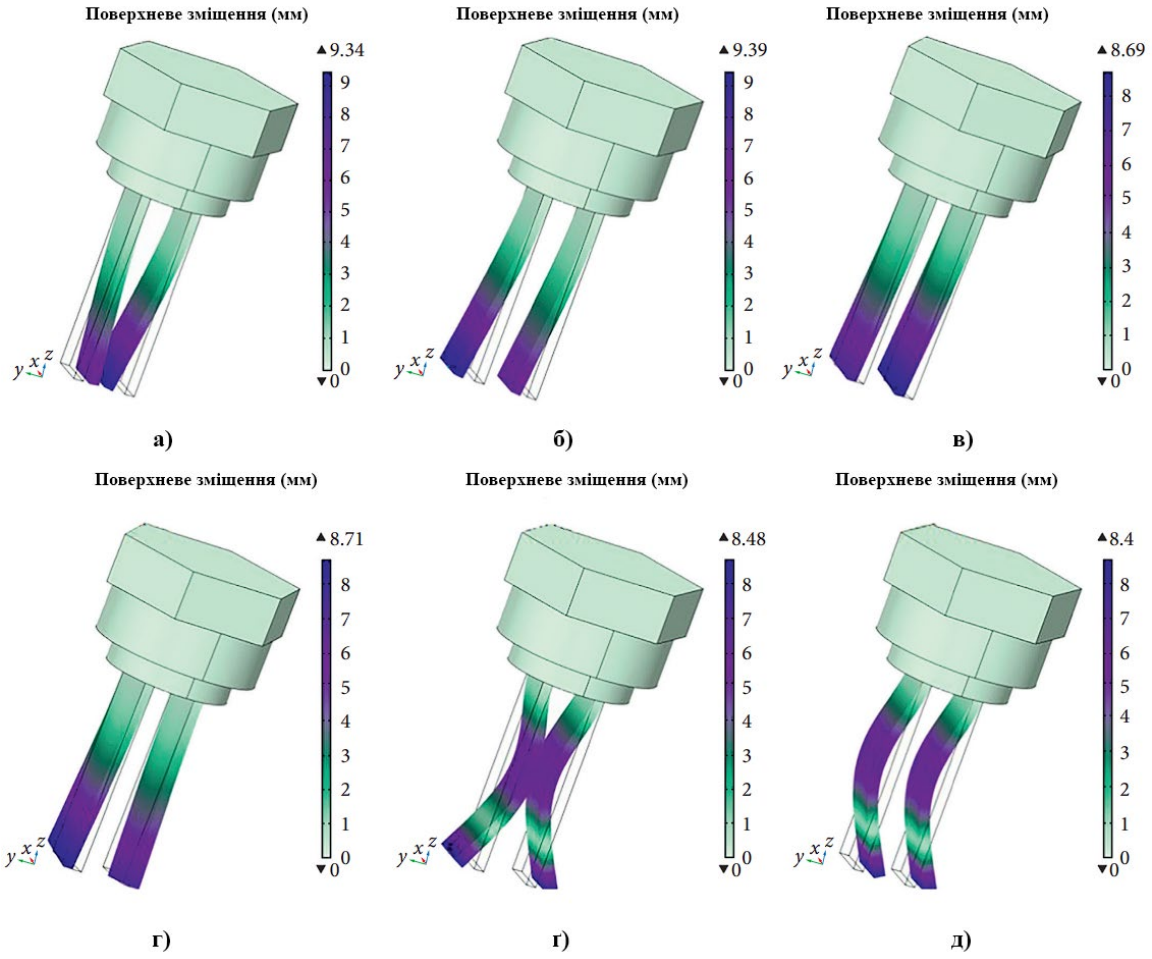


Рисунок 3.16 – Вібраційна модель камертона в різних порядках. (а), (б), (в), (г), (ґ) і (д) — моди коливань камертона від порядку 1 до порядку 6 відповідно.

Різні розміри камертона призведуть до зміни резонансної частоти камертона. Для першої модової форми камертона шляхом зміни довжини, ширини та товщини камертона моделюється власна частота першої резонансної частоти в порівнянні з теоретичним розрахунковим рівнянням (3.12), щоб перевірити вплив розмірів камертона на роздільну здатність вимірювання частоти в рівнянні (3.24).

У таблиці 1 показано результати моделювання першої власної частоти моделі камертона з різною довжиною, шириною та товщиною для програмного забезпечення моделювання COMSOL. Серед них конструкція камертона з довжиною l=80 мм, шириною c = 20 мм і товщиною b = 5 мм, яка є поширеною конструкцією камертону в сигналізаторах рівня та датчиках щільності з прямокутною структурою. Згідно з рівнянням (3.24), довжина, ширина та товщина камертона зменшуються, щоб зменшити ефективну масу mg тіла вилки та покращити роздільну здатність вимірювання частоти.

Результати моделювання та результати теоретичного розрахунку власних частот першого порядку камертонів різної конструкції наведені у додатку А. З додатку А видно, що при довжині камертона однакової площі поперечного перерізу 40 мм і 80 мм відповідно, власна частота обернено пропорційна квадрату довжини корпусу вилки, що узгоджується із співвідношенням між довжиною корпусу вилки та її власною частотою в рівнянні (3.12).

3.6 Моделювання впливу в'язкості рідини на резонансну частоту камертона

Кінцевий елемент COMSOL використовувався для моделювання частоти вібрації камертона в рідинах різної в’язкості, а зв’язок рідина-тверде тіло було обрано як фізичне поле моделювання; як об’єкт дослідження для встановлення моделі використано характерну частоту [41].

Властивість рідини - рідка вода, а щільність встановлена як 1 г/см3. В умовах обмеження рідини параметри швидкості на вході та виході

встановлюються рівними 0 м/с, а статичний стан рідини узгоджується зі станом рідини в експериментальному середовищі. Геометрична модель показана на рисунку 3.17.

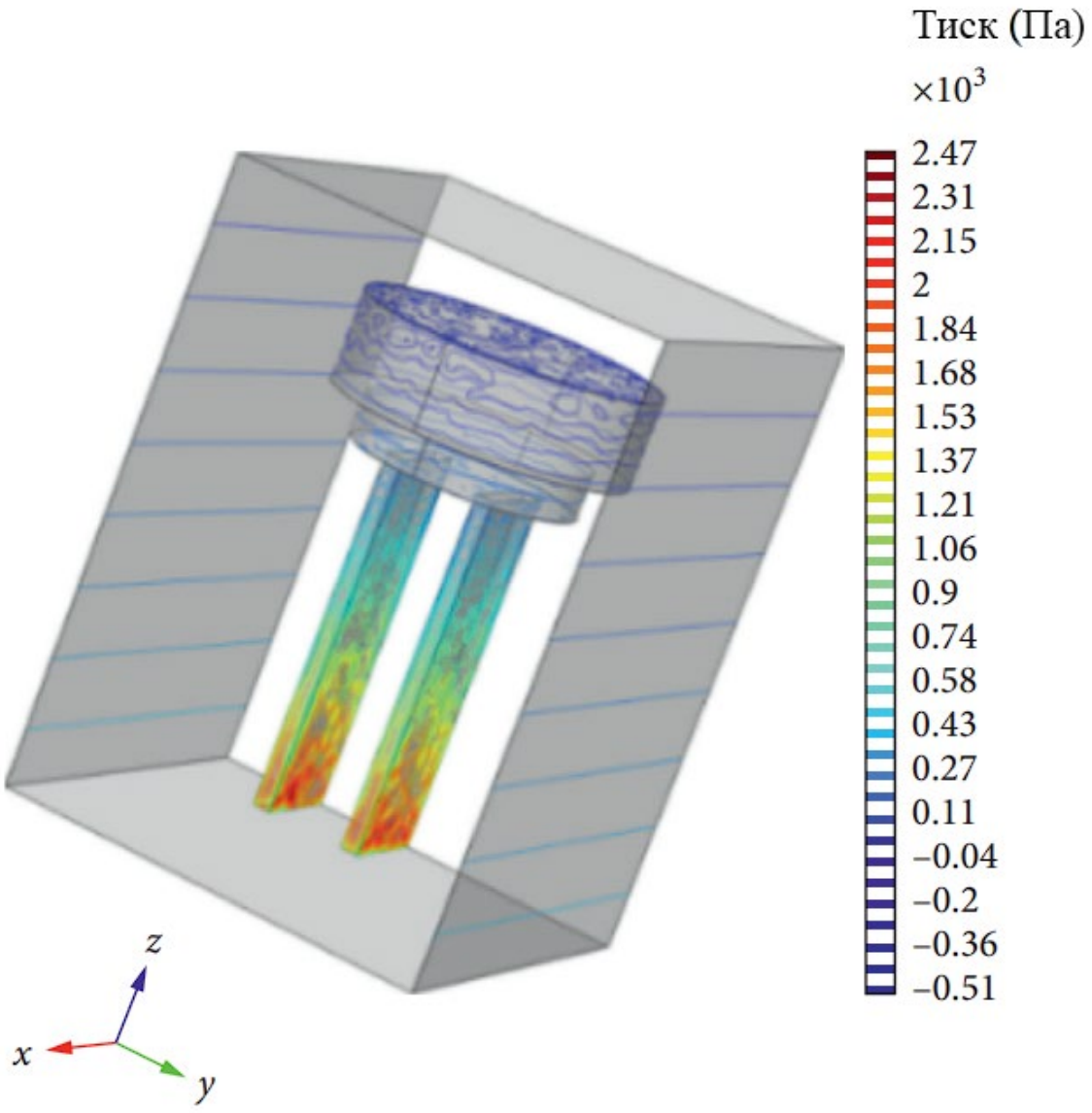


Рисунок 3.17 – Побудова експериментальної геометричної моделі впливу в'язкості рідини на резонансну частоту камертона.

Властивість матеріалу в кубоподібній області – рідка вода, а зміна кольору вилки представлена зміною тиску. Налаштування параметрів щільності рідини базується на щільності різних рідин, виміряних

експериментально, так що результати моделювання та експериментальні результати можна легко порівнювати та аналізувати.

Щоб дослідити вплив в’язкості рідини на резонансну частоту камертона, було покращено загальну продуктивність вимірювання датчика щільності камертона. У процесі моделювання резонансні частоти камертона прямокутного поперечного перерізу та камертона круглого перерізу в рідині були змодельовані з в’язкістю рідини як змінною параметра, а структура камертона круглого перерізу використовується як еталонна структура для порівняння.

Оцінюючи частотну роздільну здатність і здатність камертона до антив’язкості, вибирається розмір камертона з більш збалансованою продуктивністю вимірювання як камертон, який використовується в наступному експерименті. Серед них в якості об’єкта дослідження обрано структуру камертона з меншими розмірами та вищою власною частотою першого порядку. Результати моделювання резонансних частот різних структурних камертонів при різних в’язкостях наведено у додатках Б та В.

У таблиці $\Delta\partial$ є швидкістю зміни резонансної частоти в рідині відповідної в’язкості та відображає вплив в’язкості рідини на резонансну частоту камертона. Чим більше $\Delta\partial$, тим більший вплив в'язкості рідини на резонансну частоту камертона:

$$\Delta\partial = \frac{f_2 - f_1}{f_2} \quad (3.25)$$

де f1 являє собою резонансну частоту структурного камертона в рідині з в'язкістю 1 МПа·с і щільністю 1 г/см3, а f2 являє собою резонансну частоту камертона при поточній в'язкості рідини.

З додатків Б та В видно, що зменшення розмірів вилки призведе до зменшення здатності камертона до антив’язкості, а резонансна частота камертона збільшиться під впливом в’язкості рідини, і це узгоджується з результатами виведеними у попередньому розділі 3.4. При однаковій ефективній масі корпусу вилки вплив в'язкості рідини на камертон з прямокутним перетином менший, ніж з круглим; отже, традиційний датчик

щільності камертона в основному приймає структуру камертона з прямокутним перетином. Зміна $\Delta\partial$ зі збільшенням в'язкості, яка формує різні розміри камертона, показана на рисунку 3.18 [42].

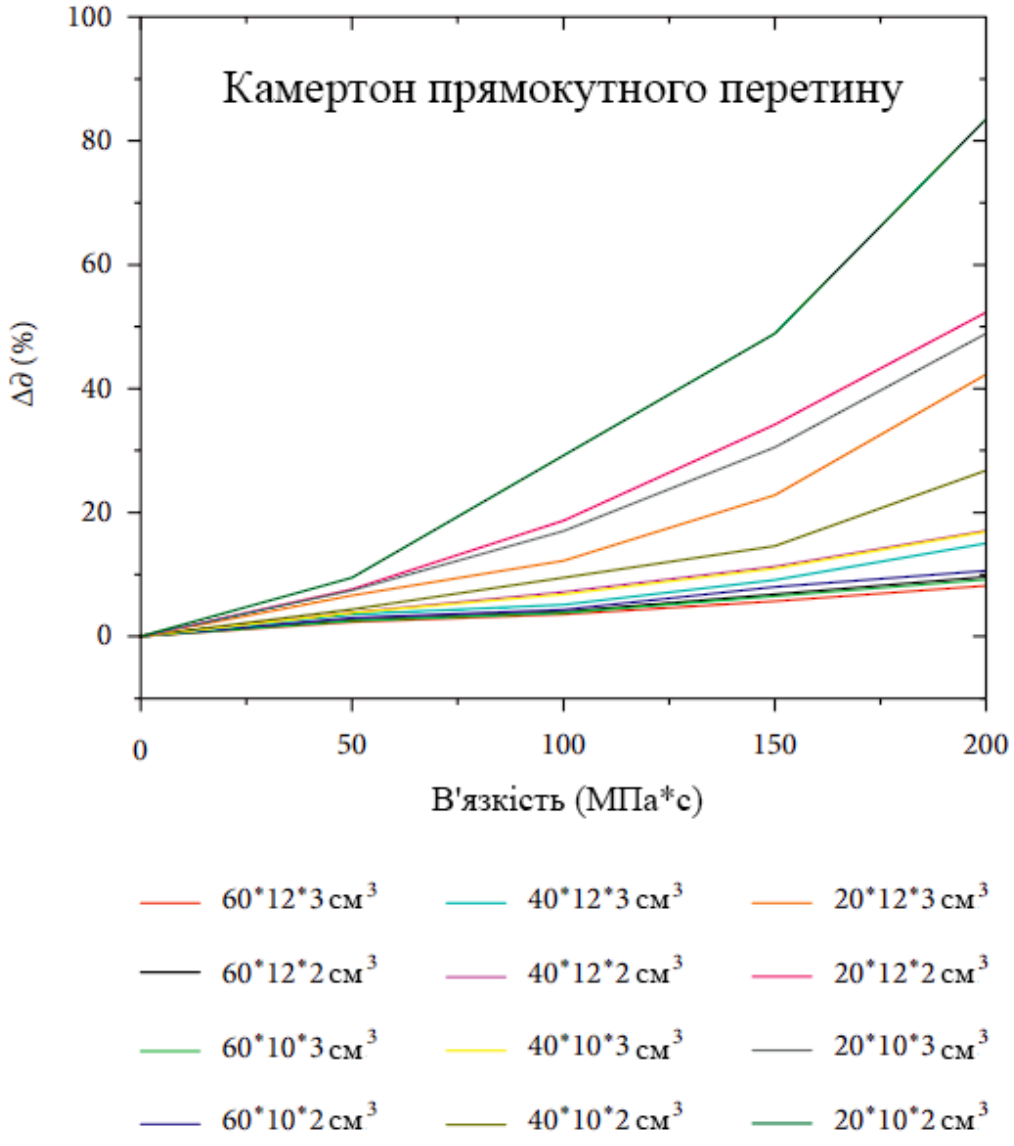


Рисунок 3.18 – Варіації зміни швидкості резонансної частоти із збільшенням в'язкості.

Зі збільшенням в'язкості рідини швидкість зміни резонансної частоти перших семи груп структур камертона поступово зростає, але відносно стабільно. В останніх п'яти групах, коли в'язкість досягала 150 МПа·с, $\Delta\partial$ різко зросла, і це показує, що резонансна частота камертона сильно залежить від в'язкості, і камертон відповідного розміру матиме величезне відхилення у вимірюванні густини рідини в рідині з в'язкістю 150 МПа·с. Тому останні п'ять груп непридатні для вимірювання густини в рідині з високою в'язкістю.

Слід відібрати перші 7 груп. З перших 7 груп вимірювань $\Delta\partial$ має малу швидкість зміни зі збільшенням в’язкості η, і це показує, що вплив в’язкості на резонансну частоту зі збільшенням в’язкості в процесі вимірювання є приблизно подібним. Крім того, вибір датчика щільності камертона повинен бути пов’язаний із фактичним середовищем вимірювання, яке можна виміряти в обмеженому просторі, тому перевага віддається датчику з простою структурою та малими розмірами. Таким чином, групи 6 і 7 є кращими, резонансна частота двох груп камертонів менше залежить від в’язкості, а $\Delta\partial$ майже однакова з різною в’язкістю.

Однак резонансна частота групи 6 вища, що означає, що роздільна здатність вимірювання резонансної частоти цього розмірного камертона вища, і це також можна сказати, що група 6 камертонів виміряла більшу продуктивність. Нарешті, група з перших 7 груп вимірювань $\Delta\partial$ має малу швидкість зміни зі збільшенням в'язкості η, і це показує, що вплив в'язкості на резонансну частоту зі збільшенням в'язкості в процесі вимірювання є приблизно подібним. Крім того, вибір датчика щільності камертона повинен бути пов’язаний із фактичним середовищем вимірювання, яке можна виміряти в обмеженому просторі, тому перевага віддається датчику з простою структурою та малими розмірами. Нарешті, в цій роботі вибрано групу 6 камертона, яка має довжину 40 мм і площу поперечного перерізу $12 * 2$ мм2.

3.7 Моделювання резонансної частоти камертона в рідині з різною щільністю.

За допомогою симуляційного аналізу впливу розмірів камертона та в’язкості рідини на резонансну частоту камертона було обрано прямокутний камертон із розміром 40∗12∗2 мм3 із більш збалансованою продуктивністю вимірювання. Результати моделювання резонансної частоти камертона цієї структури в рідинах різної щільності показані на малюнку 7, на якому властивість в’язкості рідини встановлена на 1 МПа·с.

Діапазон зміни резонансної частоти в рідкому середовищі 0,88~1,262 г/см3 становить 984,19~959,11 Гц. Резонансна частота, очевидно, змінюється зі зміною густини рідини.

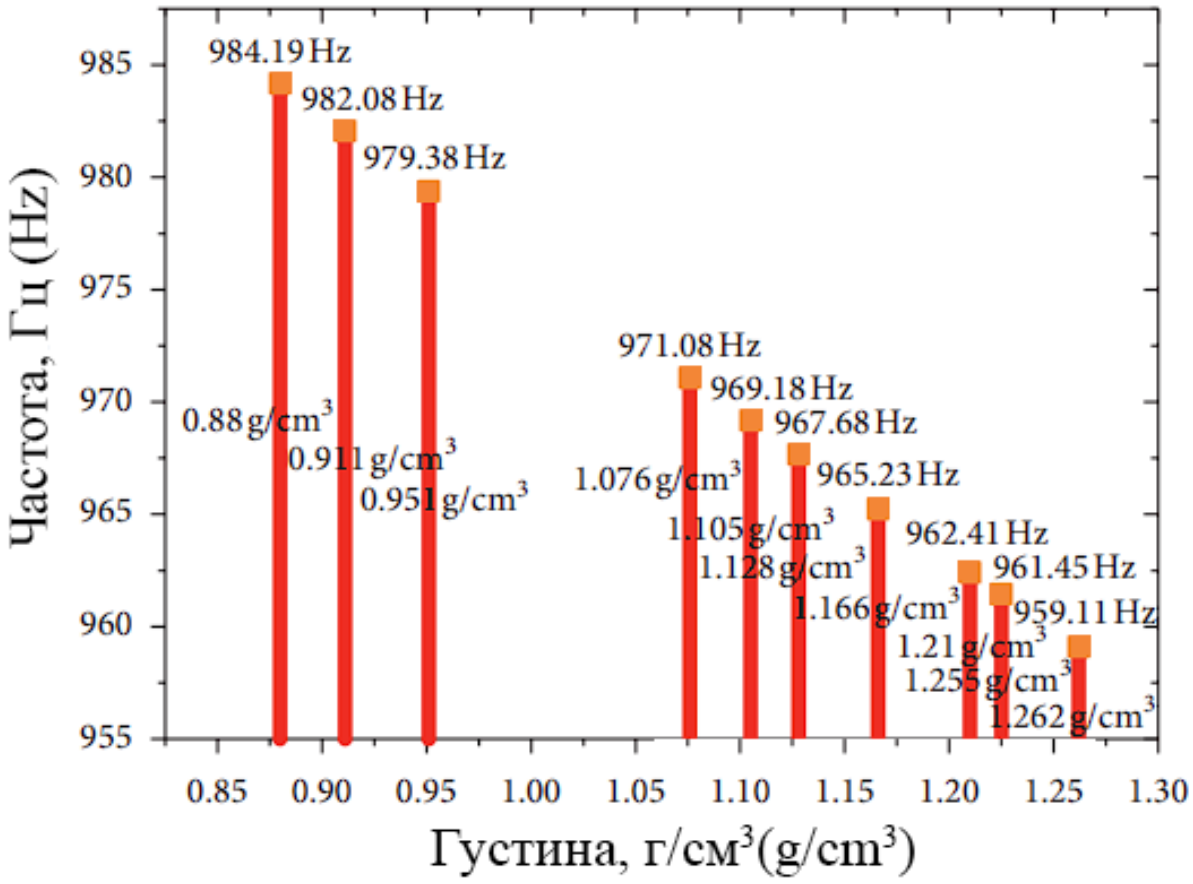


Рисунок 3.19 – Результати моделювання резонансних частот камертонів в рідинах різної щільності.

3.8 Висновки до розділу ІІІ

1. Проаналізовано та запропоновано перелік рекомендованих компонентів друкованої плати електронного блоку вібраційного датчика граничного рівня, що дозволяє їх обирати за призначенням і відповідно до бажаного впливу при формуванні вихідного сигналу датчика.
2. Розглянуто спрощену модель радіальних пружних та вигинистих коливань п'єзокерамічного резонатору, що встановило ключову роль перетворення вхідного сигналу про величину рівня матеріалу в ємності на резонансні частоти.
3. Моделювання роботи п'єзокерамічного резонатора для зразка п'єзокераміки у формі диска встановило кількісні залежності резонансних частот від геометричних та режимних параметрів.
4. Для моделі власної та резонансної частоти було досліджено камертон, що дозволило вивчати вплив параметрів конструкції на величини і точність вимірювання датчика. Таблиця результатів демонструє, які з характеристик розміру вилки найбільш підходять для досягнення поставленої мети і як збільшення розмірів камертону може зменшити вплив в'язкості рідини на резонансну частоту, але зменшити резонансну частоту і роздільну здатність вимірювання частоти. Також показує як зменшення розміру камертону призводить до зворотного результату. Аналіз власної та резонансної частоти камертону та моделювання процесу роботи датчика в рідинах виконано за допомогою COMSOL.
5. Моделювання впливу частоти вібрації камертону в рідинах різної в'язкості при зміні розмірів камертону, вивчено кількісно як датчик працює в рідинах, і чому розроблений датчик граничного рівня сипких матеріалів не підходить для виконання вимірювання рівня в рідинах, при поточних розмірах камертону. Дані дослідження використовувалися при розробці вібраційного датчика граничного рівня рідин, а також при більш глибокому дослідженні можна використовувати дані для розробки віскозиметра.

РОЗДІЛ IV ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ НА ПІДПРИЄМСТВАХ ЗБЕРІГАННЯ ТА ПЕРЕРОБКИ ЗЕРНА

Студент _____ Д. Г. Руденко

«__» червня 2023 р.

Консультант _____ Л. І. Григор'єва

д. б. н., професор

«__» червня 2023 р.

Миколаїв – 2023

РОЗДІЛ IV. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ НА ПІДПРИЄМСТВАХ ЗБЕРІГАННЯ ТА ПЕРЕРОБКИ ЗЕРНА

В даному розділі роботи розглянуті питання охорони праці на робочих місцях компанії ТОВ ІВК «ТЭМИКС». Оскільки даною розробкою зацікавилася адміністрація підприємства, яке займається розробкою і продажем устаткування для зернових компаній, то слід розглянути застосування пристрою на підприємствах зберігання та переробки зерна. Для прикладу проведемо аналіз факторів виробничого середовища у приміщеннях підлогового складу і силосу на підприємстві ТОВ «ИЗТ».

4.1 Опис підприємства зберігання та переробки зерна, робочих місць, обладнання та складання вихідних даних для кількісної оцінки умов праці

Зерносклади - це споруди з горизонтальними або похилими підлогами, призначені для зберігання зерна насипом по всій площі складу. Приміщення складу підлогового зберігання зерна ТОВ «ИЗТ» розташоване в місті Чорноморськ, Одеська область, вул. 1-го травня, 3. Ширина складу - 20 м, довжина - 62 м, висота стін, рахуючи від рівня підлоги, - 3,4 м. Загальна висота складу від підлоги до коника даху становить 9,5 м.

Підлога асфальтована. Дах двосхилий. Склад побудований, використовуючи для спорудження фундаментів і стін місцеві матеріали (залізобетон), для крокв і обрешітки даху - металопрокат, для покрівлі - покрівельний оцинкований лист.

Вікна в зерноскладі розміщене у верхній частині стін, вище зернового насипу. Вони необхідні для мінімального освітлення складу і для його вентиляції. Відношення висоти рами до її ширини зазвичай 1:2. Вікна відкриваються назовні нижнім ребром, що перешкоджає проникненню в склад атмосферних опадів. У віконних прорізах всередині складу встановлюють додаткові рами, обтягнуті металевою сіткою.

Ворота зернового складу зроблені стулковими, що відкриваються назовні. Дверні прорізи додатково закривають заставними дошками, щоб повністю використовувати обсяг складу.

Для раціональної експлуатації одноповерхових зерноскладів та здешевлення вартості зберігання зерна місткість їх повинна бути використана максимально. Це досягається розміщенням зернової маси гранично допустимим по висоті насипу шаром: для сухого зерна до 4-5 м з наявністю установок для активного вентилювання.

Стіни спираються на бутовий фундамент глибиною 800 мм. Між фундаментом і стіною укладена гідроізоляційна прокладка з двох шарів руберойду на бітумній мастиці. Навколо будівлі влаштована вимощення шириною 1 м і стічні канавки для відводу води.

Кращу схоронність зерна забезпечують стіни з малою теплопровідністю і добру гігроскопічність внутрішньої поверхні. Такі стіни добре захищають зерно від зовнішніх коливань температури, а при конденсації водяної пари в більшій мірі самі, а не зерно, поглинають цю вологу. Дах складу сприймає значну кількість сонячної енергії, тому він повинен бути малотеплопровідним.

Загальний вид обраного виробничого приміщення представлено на рисунку 4.1 та рисунку 4.2.

Рисунок 4.1 - Загальний вигляд обраного виробничого приміщення знизу

Рисунок 4.2 - Загальний вигляд обраного виробничого приміщення зверху

Напруга джерела живлення електроспоживної техніки – 220 В, напруга живлення устаткування системи вимірювання граничного рівня – 24 В. За небезпекою ураження електричним струмом приміщення відноситься до приміщень без підвищеної небезпеки ураження електричним струмом. Деякий дискомфорт, пов'язаний з виробничим освітленням, може відчуватися при роботі з об'єктами малого розміру.

Зернові добре зберігаються і не втрачають свої товарні властивості тільки в умовах правильного зберігання. Тут повинні жорстко дотримуватися норми за температурними показниками і рівнем вологості в приміщенні складу. Для цього застосовуються різні системи вентилювання самого зерна і приміщень, в якому воно зберігається. Також, особливо важливо наголосити на необхідності постійного очищення (аспірації) повітря від зернового пилу в повітрі, оскільки перевищення допустимої концентрації (більше 40 г зернового пилу на $м^3$) загрожує вибухо- і пожежонебезпечними наслідками [43].

Далі проведемо оцінку основних факторів виробничого середовища.

Природне освітлення. Освітленість виробничих приміщень та майданчиків необхідно забезпечувати відповідно до вимог ДБН В 2.5-28-2006. Освітлення виробничих приміщень має забезпечувати чітку видимість, мінімальне стомлення зору і безпеку праці. Всі приміщення повинні мати природне освітлення - верхнє, бічне або комбіноване.

У всіх виробничих і допоміжних приміщеннях повинні бути вжиті заходи до максимального використання природного освітлення.

Скляну поверхню світлових прорізів (вікон, ліхтарів і т. п.) слід періодично очищати від забруднення в терміни, встановлені адміністрацією підприємства, але не рідше двох разів на рік.

Природне освітлення будь-якої точки в приміщенні характеризується коефіцієнтом природної освітленості (КПО), які представляють собою виражене у відсотках відношення внутрішньої освітленості в цій точці до одночасної освітленості зовнішньої точки, що знаходиться на горизонтальній площині, освітленій розсіяним світлом всього небосхилу.

У таблиці 4.1 наведені коефіцієнти природного освітлення на рівні підлоги в приміщеннях підприємств зі зберігання і переробці зерна, розташованих в межах середньої широти [44].

Таблиця 4.1 – Коефіцієнти природного освітлення

Розряд роботи	Вид приміщень	Норми при верхньому комбінованому освітленні - середні	КПО,% при бічному освітленні - мінімум
I	-	-	-
II	Лабораторії	7,0	2,5
III	Ремонтні майстерні	5,0	2,0
IV	Виробничі приміщення підприємств по зберіганню і переробці зерна	4,0	1,5
V — VI	Те ж, складів	2,0…3,0	1,0…0,5

Норми КПО, наведені в таблиці 4.1, підлягають множенню на коефіцієнти:

0,75 - при розташуванні будівель на південь від 45 ° пн. шир.

1,2 -при розташуванні будівель на північ від 60 ° пн. шир.

Вентиляція та опалення. Санітарно-гігієнічні умови повітряного середовища в робочій зоні виробничих приміщень повинні відповідати вимогам діючих нормативних актів. Всі виробничі та допоміжні приміщення підприємств незалежно від ступеня забрудненості в них повітря повинні мати природну, механічну і мішану вентиляцію. Вентиляційні та витяжні шафи, поряд зі здійсненням технологічних процесів виробництва, повинні забезпечувати нормальні метеорологічні санітарні умови виробничих приміщень та усунення можливості виникнення вибухів пилу і пожеж.

Вентиляційні та аспіраційні установки не повинні створювати протягів в робочих приміщеннях. Всі машини і механізми, при роботі яких утворюється пил що може переходити в робочу зону виробничих приміщень, повинні аспіровуватися. При цьому повинні бути усунені щілини і нещільності в дверцятах, люках і з'єднаннях, через які може пробиватися пил в приміщення.

Всі силоси і бункери повинні бути обладнані аспірацією або іншими пристроями з метою, щоб при заповненні їх зерном, запилене повітря не надходило в виробниче приміщення [45].

Вміст пилу в повітрі робочої зони не повинен перевищувати встановленої гранично допустимої концентрації (ГДК) г/м3 відповідно до ГН 2.2.5.1313-03.

Таблиця 4.2 – Вміст пилу в повітрі робочої зони

№ з/п	Наименование вещества	Величина ПДК, г/м3
1	Зерновий пил (незалежно від змісту двоокису кремнію)	40,0
2	Пил рослинного і тваринного походження: з домішкою двоокису кремнію понад 10% (луб'яна, бавовняна, бавовняна, деревна та ін.)	2,0
2.1	З домішкою двоокису кремнію від 2 до 10%	4,0
2.2	З домішкою двоокису кремнію менше 2% (борошняна, бавовняна, деревна та ін.)	6,0
3	Окис заліза з домішкою оксидів марганцю до 3%	6,0
4	Окис заліза з домішкою фтористих або від 3 до 6% марганцевих сполук	4,0
5	Окис цинку	6,0
6	Марганець (в перерахунку на МнО2)	0,3
7	Окис кобальту	0,5
8	Окситетрациклін	0,1
9	Тетрациклін	0,1

Вимоги до застосування засобів захисту працюючих. Для попередження виробничого травматизму та захисту працюючих від небезпечних і шкідливих виробничих факторів і зниженої температури в холодний період року слід використовувати засоби колективного та індивідуального захисту.

Робітники і службовці повинні бути забезпечені спецодягом, спецвзуттям, засобами індивідуального захисту.

Порядок забезпечення засобами індивідуальної безпеки регулюється на законодавчому рівні. Положення про засоби індивідуального захисту, яке було прийняте наказом № 53 Державного комітету України з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду 24 березня 2008 року, наразі є нечинним. З початку 2019 року потрібно орієнтуватися на Мінімальні вимоги безпеки і охорони здоров’я при використанні працівниками засобів індивідуального захисту на робочому місці, затверджені наказом Мінсоцполітики від 29.11.2018 № 1804.

Норми видачі санітарного одягу та санітарного взуття працівникам підприємства харчової промисловості, зайнятим на елеваторах та зернових складах визначається галузевими нормами безплатної видачі спеціального одягу, спеціального взуття та інших засобів індивідуального захисту робітникам і службовцям елеваторної, борошномельно-круп'яної і комбікормової промисловості. У тому числі до таких речей відноситься і респіраторні маски [46].

Фактори умов праці на підприємствах зберігання та переробки зерна. Далі буде наведено таблицю (таблиця 4.3), в якій записані значення факторів умов праці на підприємствах зберігання та переробки зерна та їх тривалість дії.

Таблиця 4.3 – Фактори умов праці на підприємствах зберігання та переробки зерна

№ з/п	Фактор умов праці на робочому місці	Значення показника	Тривалість дії фактора, хв.
1	Температура повітря на робочому місці (РМ) у виробничому приміщенні, °С: - теплий період - холодний період	 38 18	 480 240
2	Відносна вологість повітря на РМ, %	15	480
3	Швидкість руху повітря на РМ, м/с	0,2	480
4	Освітленість на РМ, лк	500	480
5	Мінімальний розмір об’єкта розпізнавання, мм	2	120
6	Виробничий шум, дБА	80	480
7	Інтенсивність теплового випромінювання, Вт/м²	150	420
8	Токсична речовина, озон, кратність перевищення ГДК	1	480
9	Виробничий пил (паперовий та ін.), кратність перевищення ГДК	2	480
10	Робоче місце (РМ), поза та переміщення у просторі	Робоче місце динамічне, маса переміщення вантажу до 20 кг	480
11	Кількість важливих об’єктів спостереження	6	480
12	Тривалість зосередженого спостереження, % часу зміни	75	360
13	Тривалість повторюваних операцій, с	120	360
14	Змінність роботи	Дві зміни	480
15	Тривалість безперервної роботи за добу, годин	10	600
16	Режим праці та відпочинку	Відсутність обґрунтованого режиму праці та відпочинку	480
17	Нервово-емоційне навантаження	Складні дії по заданому плану з можливістю корегування	480
18	Кількість рухів пальців на годину	1000	360

Інтегральна оцінка умов праці на підприємствах зберігання та переробки зерна. Для отримання інтегральної оцінки умов роботи в обраному робочому приміщення використовуємо таблицю 4.3. Також виконуємо оцінку питомої ваги представлених факторів виробничого середовища і трудового процесу, згідно з даними з таблиці 4.4.

$x_{н_i}$ – нормативне значення i – того фактору умов праці, прийняті значення відповідають оптимальному класу умов праці;

$x_{аб_i}$ – дійсне значення i – того фактору умов праці (відповідно до даних таблиці 4.3);

x_{x_i} – оцінка i – того фактору умов праці (відповідно до даних додатку Г), балів;

t_i – тривалість дії i – того фактору умов праці (відповідно до даних таблиці 4.3), хв.;

t_{num_i} – відносна тривалість дії i – того фактору умов праці (за прийнятої тривалості робочої зміни $t_p = 480$ хв.), хв., тобто:

$$t_{num_i} = \frac{t_i}{t_p} = \frac{t_i}{480};$$

$x_{ф_i}$ – фактична оцінка питомої ваги i – того фактору умов праці, балів, а саме:

$$x_{ф_i} = x_{x_i} t_{num_i} = x_{x_i} \frac{t_i}{480}.$$

За даними таблиці 4.4 визначаємо елемент умов праці, який одержав у балах найбільшу оцінку $x_{\max}$. Принципово таких елементів може бути декілька.

Таблиця 4.4 – Параметри, що необхідні для розрахунку інтегральної бальної оцінки умов праці на робочому місці

№ з/п	Фактор умов праці на робочому місці	Нормоване значення фактора $x_{н_i}$	Оцінка фактора		Тривалість дії фактора		Фактична оцінка питомої ваги фактора $x_{фi}$
			Абсолютна $x_{абі}$	У балах $x_{хі}$	Хвилин t_i	У долях робочої зміни $t_{пит\ i}$	
1	Температура повітря на робочому місці (РМ) у виробничому приміщенні, ℃						
	- теплий період	23…25	32	3	480	1	3
	- холодний період	21…23	18	2	240	0,5	1
2	Відносна вологість повітря на РМ, %	40..60	15	1	480	1	1
3	Швидкість руху повітря на РМ, м/с	<0,2	0,2	2	480	1	2
4	Освітленість на РМ, лк	200	230	3	480	1	3
5	Мінімальний розмір об’єкта розпізнавання, мм	>1	2	1	120	0,25	0,25
6	Виробничий шум, дБА	50	80	3	480	1	3
7	Інтенсивність теплового випромінювання, Вт/м²	≤140	150	2	420	0,875	1,75
8	Токсична речовина, озон, кратність перевищення ГДК	≤1	1	2	480	1	2
9	Виробничий пил (паперовий), кратність перевищення ГДК	≤1	6	4	480	1	4
10	Робоче місце (РМ), поза та переміщення у просторі	РМ стаціонарне,маса переміщення до 5 кг	РМ стаціонарне,поза вільна, маса переміщене вантажу > 5 кг	2	480	1	2

Закінчення таблиці 4.4

11	Кількість важливих об’єктів спостереження	<5	6	2	480	1	2
12	Тривалість зосередженого спостереження, % часу зміни	<25	75	3	360	0,75	2,25
13	Тривалість повторюваних операцій, с	>100	120	1	360	0,75	0,75
14	Змінність роботи	Ранкова	Дві зміни	2	480	1	2
15	Тривалість безперервної роботи за добу, годин	<8	10	3	600	1,25	3,75
16	Режим праці та відпочинку	Обґрунтований з вкл.. музики та гімнастики	Відсутність обґрунтованого режиму праці та відпочинку	3	480	1	3
17	Нервово-емоційне навантаження	Прості дії за індивідуальним планом	Складні дії по заданому плану з можливістю корегування	3	480	1	3
18	Кількість рухів пальців на годину	<360	1000	3	360	0,75	2,25

Таким елементом являється елемент x_9, який пов'язаний з виробничим пилом, тобто $x_{\max}=x_9=4$. Даний елемент вважається визначаючим.

Далі розраховується:

1. Середній бал усіх елементів крім визначаючого $\bar{x}$, балів:

$$\bar{x}=\frac{\sum_{i=1}^{n-1}x_{\phi_i}}{n-1},$$

де n – фактична кількість врахованих елементів умов праці (у даному випадку n = 18).

Тоді:

$$\bar{x}=\frac{\sum_{i=1}^{n-1}x_{\phi_i}}{n-1}=\frac{3+1+2+3+0{,}25+3+1{,}75+2+2+2+2{,}25+0{,}75+2+3{,}75+3+3+2{,}25}{18-1}=2{,}17$$

2. Інтегральна бальна оцінка умов праці на робочому місці у відділі програмного забезпечення I_n, балів.

$$I_n=10*\left(x_{max}+\bar{x}\frac{6-x_{max}}{6}\right)=10*\left(4+2{,}17\frac{6-4}{6}\right)=47{,}23$$

Отримане значення інтегральної оцінки роботи відповідно до значень з таблиці 4.5 слід віднести до 4-ї категорії умов праці, а саме робота у несприятливих умовах, коли спостерігається сильне відхилення від ГДК і ГДР факторів трудового процесу та допустимих величин психофізіологічних факторів [47].

Таблиця 4.5 – Залежність категорії умов праці від величини інтегральної бальної оцінки

Діапазон інтегральної бальної оцінки	Категорія умов праці	Характер роботи
До 18	I	Роботи, що виконуються в оптимальних умовах
19…33	II	Роботи, що виконуються в умовах, які відповідають гранично допустимим концентраціям (ГДК) і рівням (ГДР) санітарно-гігієнічних елементів, а також допустимим рівням психофізіологічних факторів

Закінчення таблиці 4.5

34…45	III	Роботи, що відхиляються від ГДК і ГДР та допустимих рівнів психофізіологічних факторів
45,7…53,9	VI	Робота у несприятливих умовах праці
54…59	V	Роботи,що виконуються в екстремальних умовах
Понад 59	VI	Роботи, що виконуються в екстремальних умовах

Основною причиною такої високої бальної оцінки є такий фактор як виробничий пил. Виробничий пил не тільки негативно впливає на організм людини, але іноді і погіршує виробничу обстановку (видимість, орієнтування) в межах робочої зони. Крім того, пил може бути вибухонебезпечним, бути джерелом статичних зарядів електрики, а також може бути переносником мікробів. Вражаюча дія пилу на організм людини багато в чому визначається її фізико-хімічними властивостями, токсичністю, дисперсністю, тобто розміром частинок пилу, а також концентрацією в повітрі робочої зони.

Характер і ефективність дії пилу залежить від її заряду. Відомо, що заряджені частинки довше затримуються в легенях, ніж нейтральні, тому при інших рівних умовах вони більш небезпечні для організму.

За шкідливістю пил може бути інертним і агресивним. Інертний пил (сажа, цукровий пил і ін.) складається з речовин, що не мають токсичного впливу на організм людини. Агресивний пил (пил свинцю, миш'яку та ін.) володіє токсичними властивостями. Робота в запиленому середовищі з плином часу може призвести до професійних захворювань. Тверді порошинки з гострими краями можуть призвести до травмування очей і т.д.

Пил може мати на організм людини фіброгенну, подразнюючу і токсичну дію.

Найбільш важкі захворювання виникають при попаданні пилу в легені. Ці види захворювань носять спільну назву пневмоконіозів (по-грецьки «пневмо» - легені, «коніс» - пил). Вони мають багато різновидів (металлоконіози, зерновий пневмоконіоз, азбестоз, талькоз, цементоз, каоліноз і ін.) [48, 49].

Під впливом пилу розвиваються кон'юнктивіти, ураження шкіри і ін. Шкідливий вплив пилу погіршує важку фізичну працю. Вирішальний вплив на ступінь ураження організму людини шкідливими хімічними речовинами і пилом має концентрація їх в повітрі робочої зони і тривалість впливу. У виробничих умовах працюючі найчастіше піддаються одночасному впливу кількох шкідливих речовин. При цьому, можливе підсумовування їх впливу, незалежну шкідливу дію кожного з них або зменшення цього впливу за рахунок взаємної нейтралізації шкідливих речовин.

Методи захисту працюючих від шкідливих хімічних виробничих факторів (пилу) також різноманітні. На підприємствах, виробнича діяльність яких пов'язана зі шкідливими речовинами (пилом), повинні бути [50]:

– розроблені нормативно-технічні документи з безпеки праці при виробництві, застосуванні та зберіганні шкідливих речовин;

– виконані комплекси організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і медико-біологічних заходів.

4.2 Безпека у надзвичайних ситуаціях на об'єктах зернової промисловості

Надзвичайна ситуація (НС) - це подія або стан, яка загрожує життю, здоров'ю, майну або навколишньому середовищу людей і вимагає негайних заходів для запобігання або подолання наслідків. Надзвичайні ситуації класифікуються за характером походження, ступенем поширення, розміром людських втрат та матеріальних збитків.

Залежно від характеру походження подій, що можуть зумовити виникнення надзвичайних ситуацій на території об'єкту зернової промисловості, визначаються такі види надзвичайних ситуацій:

1) техногенного характеру;

2) природного характеру;

3) соціальні;

4) воєнні.

Керівник робіт з ліквідації наслідків надзвичайної ситуації призначається для безпосереднього управління аварійно-рятувальними та іншими невідкладними роботами під час виникнення будь-якої надзвичайної ситуації.

До прибуття керівника робіт з ліквідації наслідків надзвичайної ситуації його обов'язки виконує керівник підрозділу (служби, формування) сил цивільного захисту або оперативної групи (представник центру управління в надзвичайних ситуаціях), який прибув до зони надзвичайної ситуації першим. До прибуття керівника робіт з ліквідації наслідків надзвичайної ситуації його обов'язки виконує диспетчер об'єкта або особа старшого інженерно-технічного персоналу, яка перебуває на зміні.

Залежно від обставин, що склалися у зоні надзвичайної ситуації, керівник робіт з ліквідації наслідків надзвичайної ситуації самостійно приймає рішення щодо:

а) здійснення заходів з евакуації;

б) зупинення діяльності суб'єктів господарювання, розташованих у зоні надзвичайної ситуації, та обмеження доступу працівників до такої зони;

в) залучення в установленому порядку до проведення аварійно-рятувальних та інших невідкладних робіт необхідних транспортних засобів, іншого майна суб'єктів господарювання, розташованих у зоні надзвичайної ситуації, аварійнорятувальних служб, а також громадян за їх згодою;

г) зупинення аварійно-рятувальних та інших невідкладних робіт, якщо виникла підвищена загроза життю або здоров'ю рятувальників та інших осіб, які беруть участь у ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій;

д) інші рішення, необхідні для ліквідації наслідків надзвичайної ситуації та забезпечення безпеки постраждалих.

У випадку виникнення НС або загрози життю:

— подається (дублюється) сигнал «Увага всім!», йдеться про тривожні сирени, які мають попередити працівників про небезпеку;

— вживаються заходи щодо захисту персоналу, матеріальних цінностей та території закладу (радіаційний, хімічний, медичний захист, розосередження та евакуація, рятувальні та інші невідкладні роботи);

— організовуються роботи щодо локалізації або ліквідації НС із залученням необхідних позаштатних сил і засобів;

— здійснюється постійний контроль за станом довкілля на території, що зазнала впливу наслідків НС;

— інформується відповідний орган щодо рівня НС та вжиті заходи, пов'язані з реагуванням на цю ситуацію у закладі.

У разі виникнення НС в закладі начальник ЦЗ особисто доповідає про факт НС в відділ питань НС та цивільного захисту населення по телефону, погоджує з ними послідовність ліквідації наслідків НС та вводить у дію «План дій щодо запобігання і реагування на надзвичайні ситуації»;

З отриманням інформації про загрозу та виникнення НС спеціально призначеній особі з питань НС закладу необхідно:

— з'ясувати характер, оцінити масштаб та зробити прогноз розвитку НС, визначити її рівень;

— доповісти начальнику ЦЗ закладу про ситуацію, що склалася на місці загрози чи виникнення НС;

— визначити обсяги першочергових і наступних заходів, надати пропозиції щодо залучення сил і засобів, здійснити організацію робіт, контроль за своєчасним виконанням запропонованих заходів.

У режимі надзвичайного стану вживаються передбачені законом України «Про надзвичайний стан» заходи:

— з забезпечення стійкого функціонування закладу, першочергового життєзабезпечення працівників;

— з здійснення безперервного контролю за станом довкілля у районі надзвичайного стану;

— з посилення охорони громадського порядку та об'єктів, з звіту про розвиток НС вищим органам управління [51].

4.3 Висновки до розділу IV

Розглянуто основні фактори виробничого середовища і трудового процесу на окремих ділянках технологічного ланцюга зберігання і переробки зерна. Виконано інтегральну оцінку важкості роботи на зазначених ділянках. Встановлено, що захист органів дихання за допомогою респіратора дозволяє поліпшити умови праці і перейти з 4-ї категорії важкості умов праці до 3-ї категорії, що є виправданим для специфіки даного виробничого об'єкта.

Також було порушено питання цивільного захисту на об'єкті зернової промисловості під час надзвичайної ситуації. Описано порядок визначення керівника відповідального за ліквідації наслідків НС, безпосереднього управління рятувальними роботами під час виникнення таких ситуацій, прийняття швидких та ефективних рішень, зокрема щодо евакуації, зупинення діяльності у зоні НС, залучення рятувальних служб та транспортних засобів. Здійснення постійного контролю за станом довкілля та вживання заходів для ліквідації наслідків НС та забезпечення безпеки постраждалих. Усі ці заходи мають на меті мінімізувати наслідки НС, захистити людей та майно і відновити нормальний стан після виникнення події.

ВИСНОВКИ

1. Під час аналізу літературних джерел та економічних даних встановлено, що галузь виробництв підготовки сировини, переробної промисловості, будівельних сумішей, що використовує у технологічному процесі сипкі матеріали потребує переоснащення. Тенденції розвитку автоматизованих систем переробної промисловості засвідчують потребу впровадженя інноваційних контрольно-вимірювальних автоматизованих систем як складової для їх повної автоматизації.
2. Багаторівнева структура АСК узагальненого виробництва сипких сумішей та представлена функціональна п’ятирівнева схема, яка є гнучкою та може бути рекомендована як така, що легко адаптується до особливостей окремого виробництва.
3. АСК контрольно-вимірювальних автоматизованих систем як складова системи повної автоматизації виробництва, що розглянуто на прикладі конвеєрної лінії та яка використовується для завантаження сипкого продукту в бункер, демонструє достатність простого алгоритму інтеграції датчиків граничних рівнів з SCADA-системою. Особливо продемонстровано як при досягненні граничного рівня завантаження, що визначено датчиком рівня, SCADA-система активує та відключає процес завантаження бункера, запобігаючи його переповненню.
4. Активні вібраційні датчики (індикатори) граничного рівня, що запропоновано застосовувати для периферійного рівня керування, є прості, не вибагливі та надійні. Загальний опис функціональної блок-схеми АСК контрольно-вимірювальних систем, вібраційного датчика та конструкції, принципу роботи, технічні характеристики, а також порядок монтажу та підключення, моделі і алгоритми є детальною настановою необхідною проектантам та користувачам.
5. Представленні матеріали результатів пошуку, вибору, порівнянь та обґрунтування комплектуючих для АСК, як необхідних для контролю технологічного процесу виробництва сипких сумішей, що входять до

складу контрольно-вимірювальної системи другого та третього рівнів є детальною настановою необхідною проектантам апаратури другого та третього рівнів керування.

6. Представлений опис застосування розробки та призначення і можливостей середовища на прикладі застосування SCADA-системи в елеваторній компанії та виробництві бетону є узагальненим прикладом інтерфейсу узагальненої системи четвертого рівня керування.
7. Розглянуто спрощену модель радіальних пружних та вигинистих коливань п'єзокерамічного резонатору, що виявило ключову роль впливу на резонансні частоти величини рівня суміші в ємності, а моделювання роботи п'єзокерамічного резонатора для зразка п'єзокераміки у формі диска встановило кількісні залежності резонансних частот від геометричних та режимних параметрів, які слугуватимуть практичним матеріалом для проектування.
8. Для моделі власної та резонансної частоти було досліджено вилки камертону, що дозволило вивчати вплив форми та параметрів конструкції на діапазони величини і точність вимірювання датчика та дозволило узагальнити кількісні результати. Таблиця результатів наочно демонструє, які з характеристик розміру вилки найбільш підходять для досягнення поставленої мети і як збільшення розмірів камертону може зменшити вплив в'язкості рідини на резонансну частоту, але зменшити резонансну частоту і роздільну здатність вимірювання частоти. Також показує як зменшення розміру камертону призводить до зворотного результату. Аналіз власної та резонансної частоти камертону та моделювання процесу роботи датчика в рідинах виконано за допомогою COMSOL.
9. Моделювання впливу частоти вібрації камертону в рідинах різної в'язкості при зміні розмірів камертону, вивчено кількісно, що встановило для датчика граничного рівня сипких матеріалів або рідин границі застосовності для роботи, при поточних розмірах камертону.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Переробна промисловість регіонів України: проблеми та перспективи розвитку: монографія; ДУ “Інститут регіональних досліджень імені М.І. Долішнього НАН України”; наук. редактор д.е.н., проф. С. О. Іщук. – Львів, 2020. – 341 с.

2. Мікрохвильовий датчик вологості Aquar System - A314 – Режим доступу: https://aquar-system.uk/measurements/moisture/a314/ (Дата звернення 15.05.23).

3. Термопідвіска ТП-ДМ – Режим доступу: https://temix.com.ua/uk/product/termopodveska_tp-dm/ (Дата звернення 15.05.23).

4. Технологічні вимірювання і прилади. Вимірювання рівня та витрат [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп’ютерноінтегровані технології» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: С. Г. Бондаренко, Д. М. Складанний, А. О. Абрамова. – Електронні текстові данні. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 117с.

5. Датчик ємнісний CR18-8DP – Режим доступу: https://www.svaltera.ua/catalog/774/254.php (Дата звернення 15.05.23).

6. Ultrasonic sensor UC10000-F260-IE8R2 – Режим доступу: https://www.pepperl-fuchs.com/global/en/classid_186.htm?view=productdetails &prodid=56474 (Дата звернення 15.05.23).

7. Вібраційні датчики рівня рідких речовин SITRANS LVL 200 – Режим доступу: https://www.siemens.com/ua/uk/produkty/avtomatyzatsiya-promyslovosti/kotrolno-vymiryuvalni-prylady/vymiryuvannya-rivnya/syhnalizatsiya-hranychnoho-rivnya/sitrans-lvl200.html (Дата звернення 18.05.23).

8. VEGAMIP T61 Microwave emitter for level detection of bulk solids and liquids – Режим доступу: https://www.vega.com/en/products/product-catalog/switching/radar/vegamip-t61 (Дата звернення 18.05.23).

9. Вібраційні датчики граничного рівня на ринку України. – Режим доступу: https://temix.com.ua/product/vibracionnyj_datchik_signalizator_predelnogo_urovnja_sypuchih_materialov_dpu-10/ (Дата звернення 18.05.23).

10. Вібраційний датчик рівня FineTek SC – Режим доступу: https://simpletech.com.ua/ua/datchyky-rivnia/vibratsiinyi-datchyk-rivnia-finetek-sc (Дата звернення 24.05.23).

11. Вібраційний камертонний датчик рівня сигналізатор рівня NIVOSWITCH, вібровилка – Режим доступу: https://nivelco.com.ua /vibracionnye-kamertonnye-datchiki-urovnja.html (Дата звернення 24.05.23).

12. А.О. Бобух. Автоматизовані системи керування технологічними процесами: Навч. посібник. – Харків: ХНАМГ, 2006. - 185 с.

13. Гаврилов П.Д., Гімельштейн Л.Я., Медведєв А.Є. Автоматизація виробничих процесів: Підручник для ВНЗ/П.Д. Гаврилов, Л.Я. Гімельштейн, А.Є. Медведєв. - М.: Надра, 1985. - 216 с.

14. Богуш М.В. Проектування п'єзоелектричних датчиків на основі просторових електротермопружних моделей. М.: Техносфера, 2014. – 312с.

15. Паспорт на датчик граничного рівня ДПУ-10 – Режим доступу: https://temix.com.ua/download/ (Дата звернення 30.05.23).

16. Сигналізатори рівня сипких та рідких матеріалів СКАТ. Технічний опис та посібник з експлуатації – Режим доступу: https://kipia.info/vibratsionnyie-urovnemeryi/skat-5eh-s-b%283-2%29-200-vibratsionnyiy-datchik-urovnya-vo-vzryivozaschischennom-korpuse/ (Дата звернення 30.05.23).

17. Частотний перетворювач Siemens SINAMICS G120P – Режим доступу: https://atmic.ua/chastotnye-preobrazovateli/chastotnyi-preobrazovatel-siemens-sinamics-g120p-185-kvt-3-f380-6sl3200-6 (Дата звернення 30.05.23).

18. Mitsubishi FX5U-64MT/ESS – Режим доступу: https://mitsubishielectric.com/fa/ru_en/products/cnt/plc/plcf/cpu-module/fx5u-64mt-ess.html (Дата звернення 30.05.23).

19. Повторювач інтерфейсу послідовних сигналів ICP CON I-7510 – Режим доступу: https://ipc2u.ua/catalog/i-7510 (Дата звернення 02.06.23).

20. Комутатор Dell Networking X4012 10GbE – Режим доступу: https://servak.com.ua/image/manual/Switch/Switch_DELL_X4012_12_10Gb_SFP+_Switch_USer_Guide_Servak.pdf (Дата звернення 02.06.23).

21. Лекція про архітектуру SCADA системи – Режим доступу: системи https://elearn.nubip.edu.ua/mod/book/tool/print/index.php?id=338999 (Дата звернення 02.06.23).

22. Автоматизована система керування технологічним процесом виробництва бетону – Режим доступу: https://owen.ua/ua/projects/asktp-vyrobnytztva-betonu (Дата звернення 02.06.23).

23. Технічна документація. Мікроконтролер PIC12F1822-I/SN – Режим доступу: https://www.tme.eu/Document/5e12c93c2c0a911441f8b05b41ed7fdb/pic12f1822_23.pdf (Дата звернення 03.06.23).

24. Технічна документація. Лінійний стабілізатор напруги L78M05CDT – Режим доступу: https://www.tme.eu/Document/4c19afbd0cbf5bc0f90e84076ef5e976/78Mxx.pdf (Дата звернення 03.06.23).

25. Технічна документація. Операційний підсилювач LM358ADT – Режим доступу: https://www.rcscomponents.kiev.ua/product/lm358adt_24971.html (Дата звернення 03.06.23).

26. Технічна документація. Позистор FSMD050-2920-R – Режим доступу: https://www.microchip.ua/fuzetec/Fuzetec_2016.pdf (Дата звернення 03.06.23).

27. Технічна документація. DIP-перемикач DS-01 – Режим доступу: https://blackchip.com.ua/image/catalog/pdf/knopku/Peremikachi-DS.pdf (Дата звернення 03.06.23).

28. Технічна документація Реле G6RN-1-24 (RM96-1011-35-1024) – Режим доступу: https://www.rcscomponents.kiev.ua/datasheets/e_RM96.pdf (Дата звернення 03.06.23).

29. Технічна документація. AC/DC-перетворювач IRM-05-24 (S) – Режим доступу: http://www.kosmodrom.com.ua/pdf/IRM-05.pdf (Дата звернення 03.06.23).

30. Технічна документація. Трансформатор TEZ1.5/d230/9-9v – Режим доступу: https://www.tme.eu/Document/3799241e95c8224129080ce22de77bb2/TEZ_2020_TME_EN.PDF (Дата звернення 03.06.23).

31. Технічна документація. Діодний міст DF06M – Режим доступу: https://www.rcscomponents.kiev.ua/datasheets/DF-M.pdf (Дата звернення 03.06.23).

32. Технічні характеристики п'єзокерамічного кільця PZT4 – Режим доступу: http://ru.piezodisc.com/piezo-ceramic/piezo-ring/pzt-ring.html (Дата звернення 03.06.23).

33. Erhart J, Půlpán P, Pustka M. Piezoelectric Ceramic Resonators. Springer International Publishing, 2017.

34. Onoe M, Gillis J. Tables of modified quotients of Bessel functions of the first kind for real and imaginary arguments. Phys Today 1959, 12: 50–51.

35. Albareda A, Pérez R, García JE, et al. Nonlinear elastic phenomena near the radial antiresonance frequency in piezoceramic discs. J Electroceram 2007, 19: 427–431.

36. J. Zhang, C. Dai, X. Su et al., "Determination of liquid density with a low frequency mechanical sensor based on quartz tuning fork," Sensors and Actuators B: Chemical, vol. 84, no. 2-3, pp. 123–128, 2002.

37. B. Wang, Z. Wang, and Xi. Zuo, "Frequency equation of flexural vibrating cantilever beam considering the rotary inertial moment of an attached mass," Mathematical Problems in Engineering, vol. 2017, no. 4, 5 pages, 2017.

38. Q. Haozhi, J. Liu, W. Xiao, and B. Wang, "Quasistatic nonlinear analysis of a drill pipe in subsea xmas tree installation," Mathematical Problems in Engineering, vol. 2019, Article ID 4241363, 9 pages, 2019.

39. A. Cicirello, "On the response bounds of damaged euler-bernoulli beams with switching cracks under moving masses," International Journal of Solids and Structures, vol. 172-173, pp. 70–83, 2019.

40. L. P. Tosi and T. Colonius, "Modeling and simulation of a fluttering cantilever in channel flow," Journal of Fluids and Structures, vol. 89, pp. 174–190, 2019.

41. J. Cisonni, A. D. Lucey, N. S. J. Elliott, and M. Heil, "The stability of a flexible cantilever in viscous channel flow," Journal of Sound and Vibration, vol.

396, pp. 186–202, 2017.

42. X. Li, J. Hu, and X. Liu, “A high-performance digital interface circuit for a high-Q micro-electromechanical system accelerometer,” Micromachines, vol. 9, no. 12, 2018.

43. Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу //Охорона праці. – 2001. –№ 12. – С. 12-20. – 37 с.

44. Жидецький В.Ц. Основи охорони праці. Підручник. – Львів: УАД, 2006. – 336 с.

45. Небезпечні та шкідливі виробничі фактори – Режим доступу: https://helper.by/nebezpechni-i-shkidlyvi-vyrobnychi-faktory-zapylenisti.html (Дата звернення 12.06.23).

46. Вентиляція в зерносховищах (аркових ангарах) – Режим доступу: https://ventbazar.ua/blog/sistemy-ventilyacii-dlya-zernovyx-skladov.html (Дата звернення 12.06.23).

47. Богомолов А.В., Шерстюк В.С., Шаповаленко О.І., Гурський П.В., Заїка В.П. Охорона праці на підприємствах зберігання та переробки зерна. Навчальний посібник. – Х.: ПЛАНЕТА-ПРІНТ, 2017. – 202 с.

48. Лекція про небезпечні умови праці. Класифікація виробничих факторів та вимоги до виробничої зони – Режим доступу: http://www.dut.edu.ua /uploads/l_1333_18764683.pdf (Дата звернення 13.06.23).

49. Гетія І.Г., Леонтьєва І.М., Шумілін В.К. Методичні вказівки щодо проведення заняття з дисципліни «Безпека життєдіяльності» на тему: «Визначення інтегральної бальної оцінки тяжкості праці на робочому місці». – М.: МДАПД, 2002. – 22 с.

50. Охорона праці в медичній галузі: навч.-метод. посіб. / О.П. Яворовський, М.І. Веремей, В.І. Зенкіна та ін. – К.: ВСВ “Медицина”, 2015. – 208 с.

51. Організація заходів цивільного захисту: методичний посібник. Тернопіль: Видавець ФОП Андріїшин В. П.: Тернопіль, 2016– 568 с.

ДОДАТОК А

Порівняльна таблиця моделювання та теоретичних результатів власних частот першого порядку камертонів з різними прямокутними структурами

Площа поперечного перерізу c ∗ b (мм2)	Результати моделювання (Гц)					Теоретичний результат (Гц)				
	l=100мм	*l*=80мм	*l*=60мм	*l*=40мм	*l*=20мм	*l*=100мм	*l*=80мм	*l*=60мм	*l*=40мм	*l*=20мм
20*5	84.64	132.92	247.62	536.85	2126.79	82.99	129.05	238.19	516.21	2064.85
20*3	109.23	171.51	319.508	692.72	2744.15	107.09	166.52	307.22	666.08	2664.23
20*2	133.86	210.18	391.56	848.93	3363.05	131.24	204.06	376.50	816.28	3265.10
16*5	94.60	87.31	266.55	599.97	2376.84	92.75	84.77	256.25	576.90	2307.62
16*3	122.25	118.96	343.86	774.16	3066.90	119.86	115.50	330.64	744.39	2977.58
16*2	149.60	234.89	421.40	948.72	3758.44	146.67	228.05	405.20	912.24	3648.98
12*5	109.46	100.92	307.89	693.18	2746.05	107.32	97.99	296.05	666.52	2666.07
12*3	141.12	137.53	397.54	894.99	3545.54	138.36	133.53	382.25	860.57	3442.28
12*2	172.95	271.55	487.176	1096.80	4345.03	169.56	263.65	468.44	1054.62	4218.48
10*5	119.75	188.03	337.35	759.51	3008.82	117.41	182.56	324.38	730.30	2921.19
10*3	154.54	242.63	435.30	980.012	3882.36	151.51	235.57	418.56	942.32	3769.29
10*2	189.38	297.35	533.45	1201.00	4757.80	185.67	288.69	512.94	1154.81	4619.23

ДОДАТОК Б

Результати моделювання резонансних частот камертонів різних конструкцій у рідинах різної в'язкості

№ групи	$l*b*c$ (мм3)	η = 50 МПа·с. Частота (Гц)	Δ∂	η = 100 МПа·с. Частота (Гц)	Δ∂	η = 150 МПа·с. Частота (Гц)	Δ∂	η = 200 МПа·с. Частота (Гц)	Δ∂
1	60*12*3	623.61	2.3	615.23	3.6	601.25	5.7	585.16	8.2
2	60*12*2	764.23	2.7	754.86	4.0	732.52	6.8	710.35	9.6
3	60*10*3	682.85	2.5	674.36	3.8	655.43	6.5	636.51	9.2
4	60*10*2	836.85	3.1	825.89	4.3	793.96	8.0	771.52	10.6
5	40*12*3	764.23	3.6	751.23	5.1	730.52	9.1	688.25	15.0
6	**40*12*2**	**936.56**	**3.9**	**920.53**	**7.2**	**864.72**	**11.3**	**803.22**	**17.1**
7	40*10*3	836.84	3.8	810.84	6.8	774.30	11.0	722.97	16.9
8	40*10*2	1025.53	4.4	971.06	9.5	916.32	14.6	785.44	26.8
9	20*12*3	2494.83	6.6	2345.24	12.2	2062.01	22.8	1541.67	42.3
10	20*12*2	3057.39	7.6	2696.84	18.5	2177.32	34.2	1578.39	52.3
11	20*10*3	2731.87	7.4	2448.51	17.0	2050.25	30.5	1507.45	48.9
12	20*10*2	3347.84	9.5	2619.60	29.2	1805.62	51.2	1486.75	83.5

ДОДАТОК В

Результати моделювання резонансної частоти камертона круглого перетину у рідинах різної в'язкості

№ групи	$l*r^2\pi$ (мм3)	η = 50 МПа·с. Частота (Гц)	Δ∂	η = 100 МПа·с. Частота (Гц)	Δ∂	η = 150 МПа·с. Частота (Гц)	Δ∂	η = 200 МПа·с. Частота (Гц)	Δ∂
1	60* $3.42^2\pi$	586.25	2.2	535.23	4.1	475.92	6.5	454.93	10.2
2	60* $2.82^2\pi$	614.52	2.8	670.33	4.7	606.18	7.9	569.12	11.8
3	60* $3.12^2\pi$	599.62	2.5	587.72	4.3	528.15	7.1	484.28	11.1
4	60* $2.52^2\pi$	633.54	3.1	737.86	4.9	665.62	9.5	618.29	13.8
5	40* $3.42^2\pi$	724.25	3.8	652.55	5.7	651.14	10.8	514.02	19.2
6	40* $2.82^2\pi$	899.13	4.3	848.37	7.7	734.39	13.6	627.99	21.6
7	40* $3.12^2\pi$	796.23	4.1	725.85	7.3	642.97	11.9	563.74	20.2
8	40* $2.52^2\pi$	951.23	4.6	899.97	9.3	783.94	17.0	628.21	32.1
9	20* $3.42^2\pi$	2131.25	7.2	2152.23	12.8	1728.68	26.3	1373.44	50.2
10	20* $2.82^2\pi$	2502.32	7.8	2502.76	19.6	1942.95	40.5	1309.16	65.2
11	20* $3.12^2\pi$	2282.91	8.8	2253.96	18.1	1814.96	35.2	1237.22	58.3
12	20* $2.52^2\pi$	2831.22	10.2	2432.74	32.3	1649.26	59.2	872.52	88.2

ДОДАТОК Г

Критерії бальної оцінки умов праці

№ п\п	Фактор умов праці на робочому місці	Оцінка, бали					
		1	2	3	4	5	6
1	Температура повітря на робочому місці (РМ) у виробничому приміщенні, °С: - теплий період - холодний період	 23…25 21…23	 26…28 18…20	 29…32 15…17	 33…35 12…14	 35…37 Нижче +12	 >37 -
2	Відносна вологість повітря на РМ, %	40…50	55…60	61…75	76…85	Понад 85	-
3	Швидкість руху повітря на РМ, м/с	Менше 0,2	0,2…0,5	0,6…0,7	0,8…1,2	1,3…1,7	Понад 1,7
4	Освітленість на РМ, лк	≥300	240…300	160…230	100…150	60…90	30…50
5	Мінімальний розмір об’єкта розпізнавання, мм	> 1,0	1…0,3	< 0,3	0,005…0,3	< 0,05	-
6	Виробничий шум, перевищення ГДР, дБА	< 1	Рівно ГДР	1…5	6…10	> 10	> 10 з вібрацією
7	Інтенсивність теплового випромінювання, Вт/м²	≤140	141..1000	1001…1500	1501…2000	2001…2500	>2500
8	Токсична речовина, озон, кратність перевищення ГДК	-	≤1	1…2,5	2,6…4,0	4,1…6	> 6,0
9	Виробничий пил (паперовий), кратність перевищення ГДК	-	≤1	1…5	6…10	11…30	> 30

Закінчення додатку Г

10	Робоче місце (РМ), поза та переміщення у просторі	РМ стаціонарне, поза вільна, маса переміщене вантажу ≤ 5 кг	РМ стаціонарне, поза вільна, маса переміщене вантажу > 5 кг	Робоче місце стаціонарне, поза не вільна, до 25 % часу зміни у нахиленому положенні до 30°	РМ стаціонарне ,поза вимушена – до 50 % робочої зміни	РМ стаціонарне, поза вимушена, незручна – більше 50 % робочої зміни	РМ стаціонарне, поза вимушена, незручна, нахили під кутом до 60 град більше 300 разів за робочу змін
11	Кількість важливих об’єктів спостереження	Менше 5	5…10	11…25	Понад 25	-	-
12	Тривалість зосередженого спостереження, % часу зміни	Менше 25	25…50	51…75	76…85	86…90	Понад 90
13	Тривалість повторюваних операцій, с	Понад 100	31…100	20…30	10…19	5…9	1…4
14	Змінність роботи	Ранкова зміна	Дві зміни	Три зміни	Нерегулярні зміни	-	-
15	Тривалість безперервної роботи за добу, годин	-	< 8	< 12	> 12	-	-
16	Режим праці та відпочинку	Обґрунто-ваний, з включенням музики та гімнастики	Обґрунто-ваний, без включення музики та гімнастики	Відсутність обґрунтованого режиму праці та відпочинку	-	-	-
17	Нервово-емоційне навантаження	Прості дії за індивідуальним планом	Прості дії за заданим планом з можливістю корегування	Складні дії за заданим планом з можливістю корегування	Складні дії за заданим планом при дефіциті часу	Відповідальність за безпеку людей	Індивідуальний ризик
18	Кількість рухів пальців на годину	< 360	360…720	721…1080	1081…3000	> 3000	-