

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
КОНОТОПСЬКИЙ ІНСТИТУТ

Кафедра електронних
приладів і автоматики

Кваліфікаційна робота бакалавра
ЗАСОБИ КОНТРОЛЮ ПИЛУ В ГАЗОВИХ СЕРЕДОВИЩАХ

Студент групи ЕІз-71к

В.В. Гайдай

Науковий керівник,
викладач, к.н.-ф.н.

В.В. Бібик

Нормоконтроль,
ст. викладач, к.т.н.

О.Д. Динник

Конотоп 2021

РЕФЕРАТ

Об'єктом дослідження даної кваліфікаційної роботи є засоби контролю пилу в газових середовищах.

Мета роботи полягає у вивченні принципів дії, конструкції, технологічних параметрів засобів контролю пилу в газових середовищах аналізу областей і специфіка використання.

Вугільний пил є одним з основних джерел ризику для здоров'я та безпеки на поверхневих та підземних вугільних шахтах. Моніторинг та контроль вугільного пилу є найважливішими заходами в будь-якій експлуатації вугільних шахт. Оптичне зондування пилу стало життєздатною технологією контролю пилу, оскільки воно має ряд переваг перед звичайними гравіметричними методами.

Волоконно-оптичні датчики особливо цінні при зондуванні частинок пилу в небезпечних середовищах та при наявності вибухових речовин у вугільних шахтах. У цій роботі представлений огляд використання волоконно-оптичних датчиків для вимірювання концентрація пилу.

Робота викладена на 36 сторінках, у тому числі включає 23 рисунків, 1 таблиці, список цитованої літератури із 27 джерел.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: КОНТРОЛЬ ПИЛУ, ОПТИЧНІ ДАТЧИКИ, РОЗСИЮВАННЯ СВІТЛА, МОНІТОРИНГ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА, ГІРНИЧА ПРОМИСЛОВІСТЬ, ВБУДОВАНИЙ ДАТЧИК

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1 ПИЛ В ГАЗОВОМУ СЕРЕДОВИЩІ	5
1.1 Винекнення пилу та способи його аналізу	5
1.2 Параметри сенсорів пилу	6
1.3 Принципи роботи датчиків пилу.....	8
1.4 Волоконно-оптичні датчики пилу.....	10
РОЗДІЛ 2. БЕЗПЛОТНІ ЛІТАЛЬНІ АПАРАТИ ЯК СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ АНАЛІЗУ ПИЛУ В ГАЗОВИХ СЕРЕДОВИЩАХ	17
2.1 Квадрокоптери для аналізу пилу	17
2.2 Архітектура системи	18
2.3 Газочутливий вузол	19
2.4 Платформи БПЛА	20
2.5 Стендове тестування оптичних датчиків	23
РОЗДІЛ 3. СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ЗА ПИЛОМ	24
3.1 Система моніторингу за пилом Plug and Play	24
3.2 Архітектура системи Plug and Play	24
3.3 Експериментальні результати системи Plug and Play	28
3.4 Система аналізу пилу на основі технології ZigBee.....	29
3.5 Принцип дії системи аналізу пилу ZigBee.....	30
ВИСНОВКИ	33
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	34

ВСТУП

У сучасній гірничодобувній галузі викиди пилу все ще зростають через велику механізацію та збільшення швидкості експлуатації. Нещодавні аварії на польських шахтах, кількість яких після деякої тимчасової стабілізації знову зростає, показала далеко недостатній рівень захисту від наявних там ризиків. Очевидно, що необхідний пильний контроль за найнебезпечнішими реагентами небезпеки, а також повітряним пилом, щоб підтримувати гірниче середовище на рівні безпеки.

Методи контролю пилу, які зараз використовуються, можна класифікувати як гравіметричні та оптичні методи [1].

Перший, гравіметричний метод - в даний час використовується в шахтах як еталонний метод згідно польських стандартів. У цьому методі контрольований обсяг досліджуваного повітря фільтрується, і осад фільтра перевищує вагу. Цей метод дуже добре працює при оцінці загального фактора ризику для здоров'я після події, але не надто корисний для миттєвого попередження про ризик і навряд чи може бути застосований в системі автоматичного моніторингу.

Швидкий моніторинг концентрації пилу в прозорих середовищах, таких як повітря, в режимі реального часу легко здійснюється оптичними методами, заснованими на ефектах, пов'язаних із послабленням світла частинками пилу. Ці ефекти - це відбиття, поглинання та розсіювання світла. Будь-який з них може бути використаний для оцінки вмісту пилу в повітрі.

Теоретичний аналіз показує, що немає можливості отримати точні дані про концентрацію пилу безпосередньо за допомогою простих вимірювань інтенсивності розсіювання. Для його отримання необхідно обробляти дані вимірювань, порівнюючи їх із заздалегідь визначеними калібрувальними стандартами, що відповідають індивідуальному пиловому середовищу ці всі вимоги можуть задовольнити комплексні системи аналізу пилу.

РОЗДІЛ 1

ПИЛ В ГАЗОВОМУ СЕРЕДОВИЩІ

1.1 Виникнення пилу та способи його аналізу

Гірничодобувна промисловість та газодобувна промисловість в усьому світі є важливими видами економічної діяльності. В процесі роботи утворюються такі частинки (пил) та гази, як метан (CH_4), вуглекислий газ (CO_2), оксиди азоту (NO_x) та оксиди сірки (SO_x), які мають потенційно небезпечний вплив на навколишнє середовище, здоров'я та саму роботу.

Вибухові роботи, зокрема, включають такі ефекти, як повітряний вибух, вібрація ґрунту, токсичні гази та тверді частинки. Тверді частинки, аерозолі, аміак, вуглекислий газ (CO_2), азот, оксиди азоту (NO_x) та оксиди сірки (SO_x) є основними залишками, що утворюються під час вибухових робіт на місцях видобутку корисних копалин. В ідеальній ситуації екзотермічна реакція утворює CO_2 , водяну пару та молекулярний азот (N_2), однак через екологічні та технічні фактори інші шкідливі гази часто утворюються в різних концентраціях.

Вибухонебезпечний пил є значною потенційною небезпекою, і нові методи моніторингу постійно досліджуються. Авторами [1] було розроблено мультиплатформенну систему із застосуванням наземних пробовідбірників пилу в поєднанні з балонними пробовідбірниками поблизу відкритих шахт. Зібрані дані інформували багаторазові регресійні та нейромережеві моделі, як контролювати та прогнозувати дрейф шлейфів вибуху, тобто його траєкторію та що утвориться в наслідку.

Оскільки пробовідбірники були статичними під час вибухових робіт, цей підхід вимагав детальних планів вибухових робіт та сприятливих погодних умов для визначення їх взаємозв'язку. За такої конфігурації моделі нейронних мереж ефективніше, ніж множинні моделі регресії, прогнозували результати.

Крім того, нелегальні викиди NO_2 та PM_{10} при видобутку вугілля в долині Хантер, Австралія, були досліджені за допомогою гравіметричних методів та методів LIDAR. LIDAR забезпечувався інтегрованим лазерним сигналом концентрації з дуже низьким рівнем виявлення, але вимагав фіксованого розташування. Автори [1] використали інший підхід, застосувавши NDIR (недисперсійне інфрачервоне випромінювання) та mini-DOAS (диференціальну оптичну абсорбційну спектроскопію) для прогнозування NO_x та інших забруднюючих газів. Цей метод також вимагав фіксованого наземного зондування.

Автори [1] оцінили фракції твердих частинок, використовуючи датчик пилу з сцинтиляційним зондом (монітори екологічного бета-ослаблення - EBAM) та лазерний фотометр у реальному часі (Dusttrak) у долині Хантер та Центральному Квінсленді і це підтвердило, що в процесі вибуху виділяється суміш в якій $\text{PM}_{2,5}$ є невеликою часткою загальних збуджених вибухових частинок, тоді як PM_{10} є домінуючим [1].

1.2 Параметри сенсорів пилу

Метод і тип датчиків, що використовуються для вимірювання викидів забруднюючих газів або пилу, варіюватимуться залежно від типу викидів, діапазону концентрацій, що викликає загрозу, та необхідного часу реакції.

Сенсори зазвичай базуються:

- ультразвукових сенсорних елементах;
- оптичних сенсорних елементах;
- електрохімічних сенсорних елементах.

Ці датчики можуть бути як портативними, так і встановленими в транспортних засобах, на амуніції робітників або утворювати наземні мережеві системи. У табл. 1.1 наведені різні приклади датчиків та їх характеристики, класифіковані за способом їх реалізації. Мережеві системи дуже корисні, коли слід контролювати певні рецептори або області.

Табл. 1.1 Приклад сенсорної технології, що використовується для моніторингу газів у гірничодобувній, нафтовій та газовій промисловості

Інструмент	Опис	Гази / Частинки	Характеристика
Портативний			
Dräger X-am 5600	Компактний прилад для вимірювання до 6 газів; відповідає стандарту IP67; ІЧ-датчик для CO ₂ та електрохімічний для інших газів.	O ₂ , Cl ₂ , CO, CO ₂ , H ₂ , H ₂ S, HCN, NH ₃ , NO, NO ₂ , PH ₃ , SO ₂ , O ₃ , амін, одорант, COCl ₂ та органічні пари.	Розміри: 4,7 × 13,0 × 4,4 см. Вага: 250 г.
Встановлюється в наземних транспортних засобах			
Геодезист Пікарро	Технологія кільцевої спектроскопії (CRDS), чутливість до частки на мільярд (ppb); обстежувати газ на швидкості руху та відображати результати карти в реальному часі; аналіз у реальному часі для розрізнення природного газу та інших біогенних джерел.	CO ₂ , CO, CH ₄ і водяна пара	Розміри: Аналізатор 43,2 × 17,8 × 44,6 см; зовнішній насос 19 × 10,2 × 28,0 см Вага: 24 кг + транспортний засіб Потужність: 100–240 В змінного струму
Стаціонарний			
Колісноелементний коливальний мікробаланс (TEOM)	Постійний моніторинг частинок. Конічний елемент складається з фільтруючого картриджа, встановленого на кінчику порожнистої скляної трубки. Додаткова вага частинок, які збираються на фільтрі, змінює частоту коливання трубки.	Загальна кількість зважених частинок (TSP), PM10, PM2,5	Розміри: 43,2 × 48,3 × 127,0 см) Вага: 34 кг Потужність: 100–240 В змінного струму
Мережі			
AQMesh	Бездротовий монітор; висока чутливість (рівні до ppb); призначений для роботи через мережу моніторів з масивом.	NO, NO ₂ , O ₃ , CO, SO ₂ , вологість та атмосферний тиск.	Розміри: 17,0 × 18,0 × 14,0 см Вага: <2 кг Потужність: акумулятори LiPo
У повітрі			
Жовте сканування	Технологія LIDAR загальною вагою 2,2 кг; 80000 пострілів / с; роздільна здатність 4 см; клас 1 лазер при 905 нм.	Пил та аерозолі.	Розміри: 17,2 × 20,6 × 4,7 см Вага: 2,2 кг Потужність: 20 Вт

До факторів по яким належать робити вибір датчика пилу відносять наступні параметри:

- вага і розмір;
- чутливість до вібрації та руху при монтажі;
- діапазон концентрацій датчика;
- точність та обмеження датчика;
- час спрацювання;
- середнє квадратне відхилення;
- калібрування;
- перешкоди інших газів;
- вологість;
- температура.

Оптичні світлодіодні датчики твердих частинок є потенційно придатними пристроями, які можуть бути використані для дослідження запропонованої системи. Світлодіодні датчики мають переваги низького енергоспоживання, високої довговічності, компактних розмірів та простоти в управлінні і перевірені як надійне джерело світла.

Вони також продемонстрували здатність зменшувати внутрішнє блукаюче світло і можуть бути використані як джерело світла для додатків, що вимагають численних кілометрів загального шляху проходження світла.

1.3 Принципи роботи датчиків пилу

Вибухи вугільного пилу є ще одним ризиком для видобутку вугілля. Таким чином, потужна та надійна система моніторингу пилу є важливою у будь-якій експлуатації наземних та підземних вугільних робіт для підтримки здоров'я та безпеки працівників та операцій. Гравіметричні, ультразвукові та оптичні методи зазвичай використовуються для контролю пилу в різних галузях промисловості. Гравіметричні пробовідбірники пилу працюють на основі щільності частинок пилу. Вони в основному вимірюють середню концентрацію

частинок пилу за певний період. У цьому методі концентрація пилу вимірюється на основі кількості пилу, що збирається на фільтрі.

Ультразвукові датчики працюють на основі вимірювання швидкості звуку у суспензії та розподілу частинок за розміром шляхом вимірювання загасання звуку. Для вимірювання концентрації зважених частинок також використовувались інші методи, такі як γ -промені та ємнісні зонди. Впровадження оптичних систем для контролю вугільного пилу в суворих умовах, таких як поверхневі та підземні вугільні шахти [2]. У цих системах світло може розсіюватися, передаватися, відбиватися або поглинатися, коли воно проходить через запилений простір та взаємодіє з частинками пилу (рис. 1.1) [2].

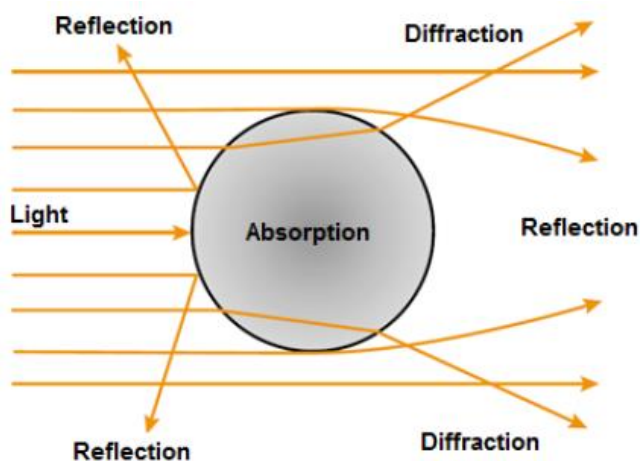


Рис. 1.1. Взаємодія світла та пилу [3]

Вони стають дедалі популярнішими в різних галузях промисловості завдяки численним перевагам перед традиційними датчиками пилу. Вони особливо цінні при зондуванні віддалених частинок там, де існує можливість електромагнітних перешкод та при виконанні робіт у присутності вибухових речовин у вугільних шахтах. Взаємодія світла та пилу змінюється залежно від характеристик навколишнього середовища та природи частинок пилу, про які йдеться. Закони, що діють тут, включають раманівське розсіювання, розсіювання Міє, релейське розсіювання та Ламберта-Біра закон поглинання.

Принцип, який в основному використовується в різних світлових датчиках, - це принципи розсіювання та поглинання. Для вимірювання концентрації пилу застосовуються принципи передачі та зворотного розсіювання. Однак закон розсіювання Міє використовується в тих випадках, коли метою є вимірювання розподілу пилу за розмірами.

1.4. Волоконно-оптичні датчики пилу

Волоконно-оптичні датчики пилу мають багато переваг у порівнянні з іншими датчиками. До цих переваг можна віднести ненав'язливу, простоту у використанні, економічність, іскробезпечну, надійну роботу в режимі реального часу. Механізм зондування залежить від об'ємної частки твердих частинок, оптичних властивостей та розміру частинок пилу. Слід також зазначити, що ефективність волоконно-оптичних датчиків залежить від геометрії датчика. Волоконно-оптичні датчики в основному класифікуються на датчики відбиття або передачі.

Для датчиків відбиття, коли світло проходить крізь частинки пилу, відбиття реєструються; тоді як для датчиків пропускання реакція зондування є функцією інтенсивності світла, що проходить через частинки пилу. Більшість волоконно-оптичних датчиків, що використовуються в місцевих практиках вимірювання пустот, таких як зонд SFR, розроблені з використанням зворотного розсіювання падаючого світла частинками у суспензії. Волоконно-оптичні датчики були розроблені на основі одного оптичного волокна, двох оптичних волокон та пучка оптичних волокон.

Сенсори з одним оптичним волокном. Для датчиків з одним оптичним волокном реакція датчиків змінюється залежно від діаметра оптичного волокна. Такий датчик випробовували у двофазних газо-твердих потоках для вимірювання швидкості та концентрації частинок. Було встановлено, що датчик надзвичайно чутливий до електростатичного впливу потоку середовища. Вимірювання швидкості були відносно недоторканими. Результати були

показані та відтворювалися з похибками від 10% до 15% для швидкостей частинок до 8 м / с.

Сенсори з двома оптичними волокнами. Для датчиків з двома оптичними волокнами (рис. 1.2) одне оптичне волокно використовується для випромінювання світла, а друге - для прийому сигналу. Реакція цих датчиків змінюється залежно від інтервалу та кута двох оптичних волокон.

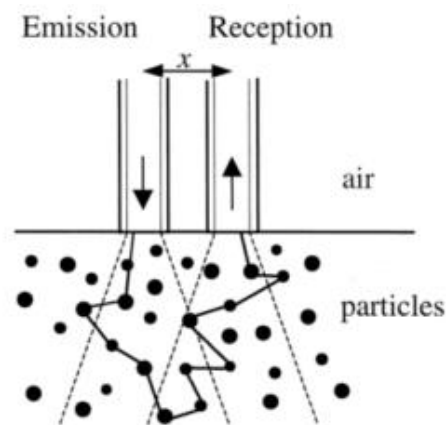


Рис. 1.2. Принцип роботи волоконно-оптичного датчика [4]

Автор [5] запропонував нову конструкцію, яка пропонувала більший об'єм вимірювання та майже лінійну чутливість (рис. 1.3). Структура датчика складалася з нахиленого на 45° світлового волокна іншого розміру (1 мм) порівняно з іншим приймаючим світловим волокном (2 мм). Волокна поміщали в кругові трубки із зовнішнім діаметром 5 мм та 10 мм відповідно. Циліндричні скляні вікна з товщиною скла 1,7 мм і 3,4 мм для менших та більших зондів відповідно, використовувались для забезпечення контакту вимірюваного об'єму та для отримання зростаючого та монотонного сигналу відгуку як функції об'ємної частки частинок.

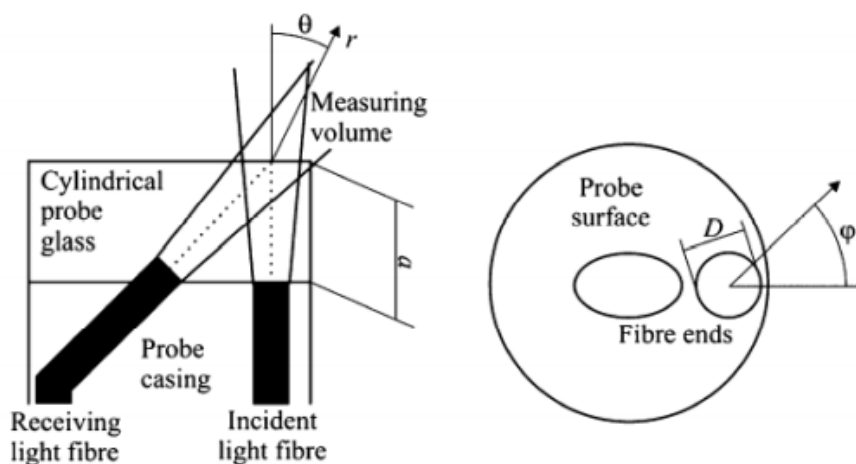


Рис.1.3. Датчик з двома оптичними волокнами [5].

Сенсори з пучком оптичних волокон. Для датчиків з пучком оптичних волокон центральне оптичне волокно використовується для випромінювання світла, а два шари навколишніх коронок оптичних волокон використовуються для прийому сигналів (рис. 1.4) [5].

Дві відстані (X_1 та X_2) між випромінюючими та приймаючими оптичними волокнами дозволяють просту обробку реакції цих датчиків. У цьому типу датчика, світло випромінюється в запилене середовище (суспензія) через центральне волокно, а розсіяне світло рухається назад через дві коронки приймаючих оптичних волокон. Принцип вимірювання пилу заснований на інтенсивності зворотного розсіяного світла, яка є функцією твердої об'ємної частки.

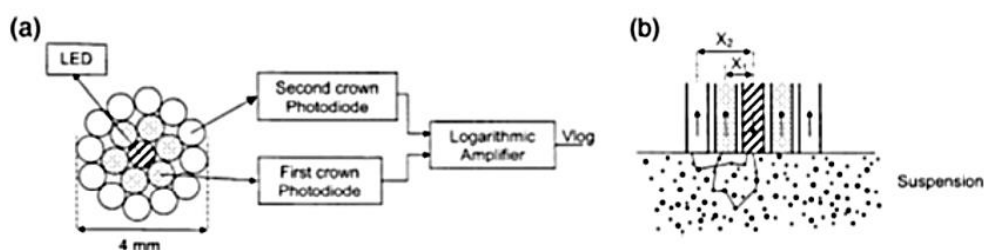


Рис. 1.4. (а) Принципова схема пучка оптичних волокон, (б) Світло, що випромінюється через центральне оптичне волокно, і зворотне розсіяне світло через навколишні оптичні волокна [6]

Автор [6] використовував паралельний триоптичний зонд з волокном, що відсилає в центрі, для вимірювання концентрації твердих частинок з діаметром, меншим і більшим за діаметр зонда (рис. 1.5). Перший виявив скупчення частинок перед зондом і відведенням, щоб подавати безперервний сигнал на виході. Оскільки цей вихідний сигнал корелює з концентрацією частинок, при правильному калібруванні отримують концентрацію твердих частинок.

Пізніше виявлені окремі частинки. Вихідний сигнал не був суміжним через виявлення частинок, більших за розмір зонда. Оскільки кількість вихідного сигналу імпульсів корелює з кількістю частинок, з урахуванням швидкості руху частинки розраховували концентрацію твердих частинок.

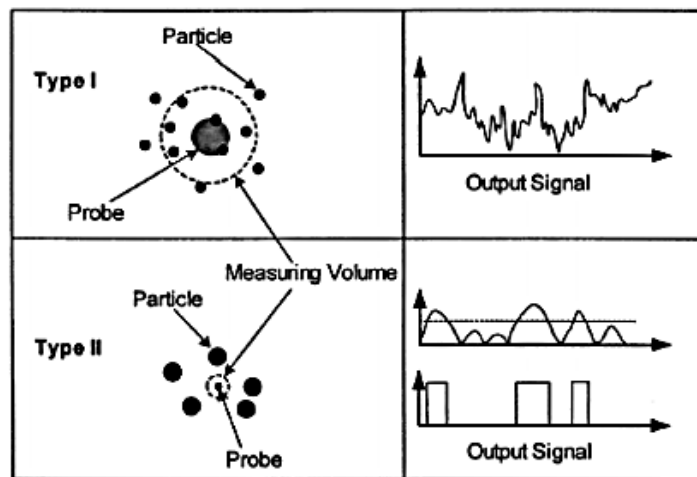


Рис. 1.5. Оптичні волокна з більшим розміром (зверху) та меншим розміром (знизу), ніж розмір частинок [7]

Автор [7] розробив один із ранніх волоконно-оптичних датчиків пилу на основі закону Релея розсіяння (рис. 1.6). Дизайн базувався на простій ідеї, що інтенсивність розсіяного світла пропорційна концентрації пилу. Пучок оптичного волокна складався приблизно з 4000 до 5000 оптичних волокон в кожному діаметром 50 мкм. Потім упакований в побутову трубку, пучок поміщали в трубу з нержавіючої сталі (ф 6 мм × 200 мм), яка виконувала роль головки датчика світла. Дослідження було зосереджено на чутливості до відстані для чотирьох типів розташування волоконно-оптичних зондів. Після

вибору зонда пристрій було випробувано в газотвердому псевдозрідженому шарі, щоб оцінити його ефективність.

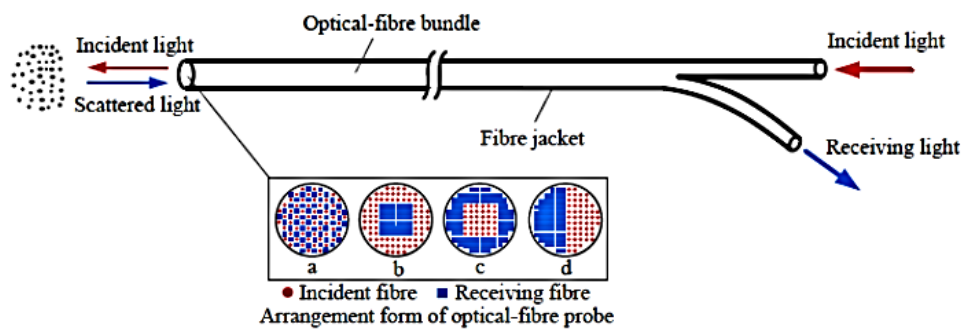


Рис. 1.6. Оптичний волоконний датчик пилу [8]

Волоконно просторова оптика для датчика пилу. На основі розсіяння світла від частинок, було досліджено волоконно-оптичний датчик для виявлення пилу на основі принципу триангуляції. За їхньою конструкцією випромінювальне оптичне волокно (F1) було з'єднане зі стрижневою лінзою GRIN (G1), щоб генерувати світло, що рухається крізь дим з кутом напівпрорізу (β), зворотне розсіяне світло було зібрано іншою лінзою (G2), підключеною до кінця приймаючого оптичного волокна (рис. 1.7). Реакцію датчика вимірювали шляхом обчислення різниці в характеристиках диму та геометрії системи [8].

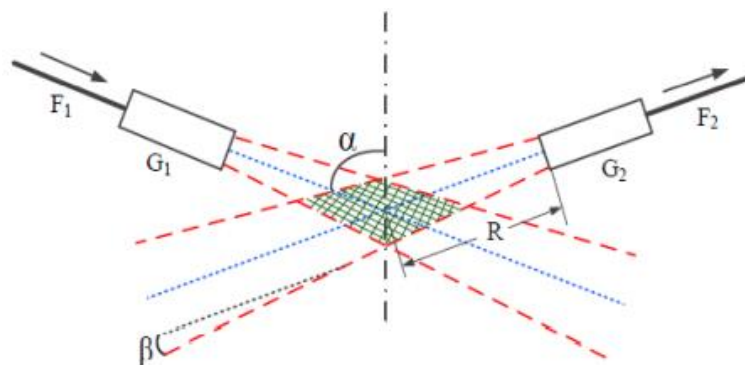


Рис. 1.7. Волоконно-оптичний датчик для виявлення пилу [8]

Ефективність волоконно-оптичного датчика для контролю скупчення пилу від зносу щітки за допомогою технології Free Space Optics (FSO). Було

використано електронний інтегратор, стрічкові кабелі та 72 датчики (рис. 1 8). Система складалася з передавальних оптичних волокон, вільного простору для взаємодії світла та пилу та прийому оптичних волокон.

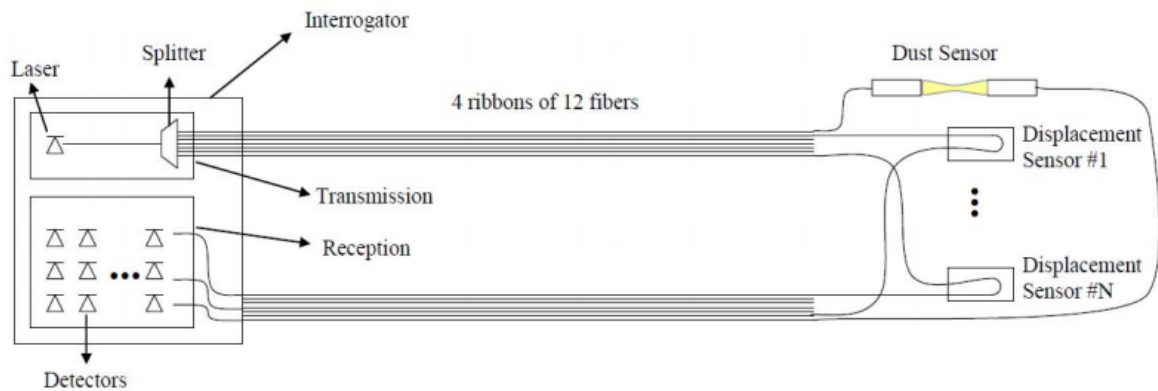


Рис. 1.8. Волоконно-оптична система датчиків, що використовує вільний простір [9]

Автор [16] представив деталі нещодавно розробленого датчика CREC-GS-Optiprobe, що має мінімальний ефект домішок для характеристики явищ скупчення в газотвердих псевдозріджених шарах.

Сенсор складався з оптичного волокна, яке функціонувало як випромінювач лазерних променів. Використовували лінзу GRIN, де обрана відстань між GRIN і емітерним волокном вела до області, віддаленої від кінчика зонда з високою інтенсивністю світла.

Датчик також використовував інше оптичне волокно з іншого боку лінзи GRIN, яке приймало і збирало світлові промені, відбиті від частинок. Там, де промінь сходився до талії, як показали випробування на відбиття, зонд створював область з високою інтенсивністю світла.

Після калібрування та вирівнювання зондів подаються сигнали, отримані дані показали відмінні піки.

Це свідчило про одночасне існування скупчень частинок на обох зондах. Для того, щоб сконцентрувати розбіжний пучок, що надходить від волокна, що направляє, використовували лінзу GRIN (рис. 1.9). Висока інтенсивність світла,

що належить до області поруч з поясом сходяться променя після лінзи, створювала вимірювальний об'єм.

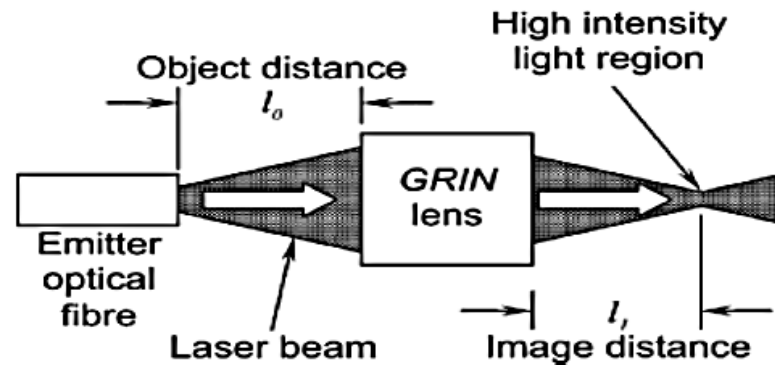


Рис. 1.9. Діаграма CREC-GS-Optiprobe [10]

Автори [11] розробили ще один волоконно-оптичний датчик для вимірювання концентрації частинок пилу. Їх датчик базувався на законі Ламберта-Біра. Він був виготовлений таким чином, що його структура дозволяла зменшувати електричні шуми, виявляти концентраційні характеристики і ставати стійкими до нагрівання та різниці в передачі.

Дослідив вплив розміру частинок в діапазоні від 36 мкм до 200 мкм для датчика з двох лінійних масивів оптичних волокон. Він представив нові моделі, підтвержені моделюванням Монте-Карло для різних розмірів частинок. Він стверджував, що ці моделі змогли відкрити шлях до простішого підходу до створення бази даних для калібрування датчика.

РОЗДІЛ 2

БЕЗПЛОТНІ ЛІТАЛЬНІ АПАРАТИ ЯК СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ АНАЛІЗУ ПИЛУ В ГАЗОВИХ СЕРЕДОВИЩАХ

2.1 Квадрокоптери для аналізу пилу

Дослідники визначають переваги БПЛА для проведення досліджень у складних місцевостях, ландшафтах, де існують ризики для здоров'я та безпеки або де бракує ресурсів (людських або економічних). Зондування газу БПЛА з використанням електрохімічних та оптичних датчиків досі недостатньо добре встановлене через швидкий розвиток датчиків та БПЛА.

Зондування CO_2 , CH_4 та водяної пари, NO_2 та NH_3 , етанолу та C_2H_6 проводили з використанням поворотних крилатих платформ.

В даний час також можливі системи з фіксованим крилом, здатні здійснювати моніторинг у реальному часі та забезпечувати індексовані зв'язані зразки. Розташування цільових зразків та масштаби джерел будуть важливі для вибору платформи та датчика через основні відмінності між БЛА з нерухомими крилами та багатороторними БПЛА, такими як потужність паріння, витривалість та обшивка польоту.

Інші підходи були застосовані для характеристики та відстеження шлейфів забруднення викидів, що втікають, та реєстрації їх концентрацій. Однак, наскільки відомо авторам, БПЛА ніколи не використовувались для аналізу викидів пилу чи газу, пов'язаних з вибуховими діями. Малі платформи БПЛА та відбір проб якості повітря в режимі реального часу пред'являють низку нових та складних вимог до відбору проб, які все ще потребують вирішення.

Швидкий час відгуку датчика важливий на мобільних зондуючих платформах, які рухаються відносно повітря і землі. Обмежена потужність вимагає ефективності польоту та датчиків з низьким енергоспоживанням.

Датчики, які вимагають тривалого часу рівноваги тривалості (~ 20 с), вимагають камер відбору проб, а затримка часу відгуку призводить до ускладнених або неможливих польотних характеристик, необхідних для повернення до передбачуваного розташування шлейфу.

Багатороторні платформи працюють через GPS і, таким чином, наближають наземний пробовідбірник, незалежно від рідини, яку він бере. Платформи з фіксованими крилами рухаються через певний об'єм повітря за певний час незалежно від місця розташування землі. Рухомі платформи вимагають контролю потоку для зразкових камер, щоб забезпечити звіт про калібровані значення.

Використання математичних моделей є важливим елементом при моніторингу якості повітря та забруднення атмосфери. Важливим є визначення відповідних моделей з урахуванням типу даних, що збираються. Існує декілька підходів, які зазвичай використовуються для повітря (коефіцієнти викидів, гауссові, лагранжійанські, ейлерові та ін.), Кожен з яких має обмеження щодо їх ефективності [12].

Покращити візуалізацію даних, оскільки поточні спроби відобразити забруднюючі речовини в атмосфері подаються як знімки, а не як динамічне середовище з вимірами концентрації, які змінюються до і після моменту, коли проводиться зчитування.

2.2 Архітектура системи

Архітектура системи для БПЛА з фіксованим крилом із вбудованим датчиком пилу (рис. 2.1) та мульти-ротором, що несе телеметричний датчик пилу, неодмінно відрізняється через використання різних автопілотів. Мікрометеорологічні дані, отримані з системи управління польотом БЛА, є новим та докладним джерелом даних для інтерпретації вимірювань якості повітря. Однак це вимагає інтеграції з даними датчиків газу, щоб забезпечити вагоме застосування.

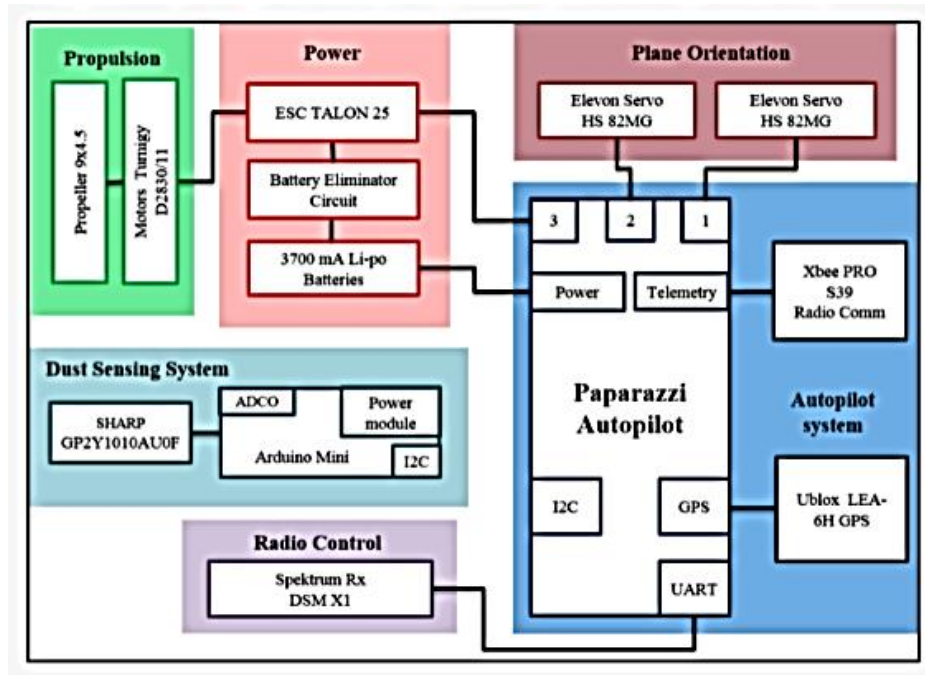


Рис.2.1. Архітектура системи для нерухомого крила БПЛА з датчиком пилу [13]

2.3. Газочутливий вузол

На сьогоднішній день експериментально оцінено два датчики: GP2Y10 (SHARP) та DSM501A (Samyoung) для PM10. Випробовувані датчики SHARP та Samyoung були підключені через мікроконтролер Arduino для інтеграції потоків даних сенсорно-телеметричної інформації. Датчик та пов'язана з ним електроніка мають невелику вагу та обмежені розміри, що дозволяє просте встановлення на інших багатороторних платформах або платформах із фіксованим крилом. Пилочутливий модуль був розміщений на верхній стороні платформи квадродротора, щоб мінімізувати високошвидкісний потік повітря, що є фундаментальним для подібних квадрокоптерів. На рис. 2.2 детально показана архітектура системи для модульного датчика пилу.

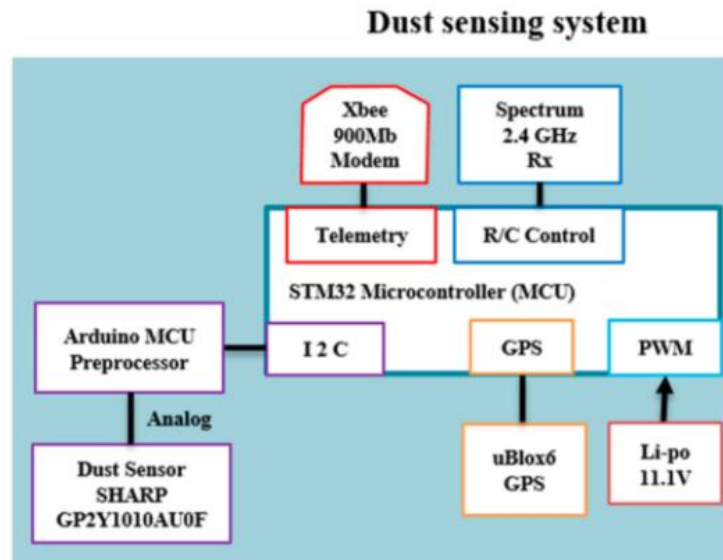


Рис. 2.2. Архітектура системи для модульного датчика пилу [14]

Система побудована навколо Arduino MEGA 256, що живиться від літєво-полімерної батареї 7,4 В, передача даних здійснюється через радіопередавач XBee Pro S1 (2,4 ГГц), а GP-635T забезпечує часову мітку для даних послідовного порту. До датчиків належать датчик температури та вологості SEN51035P та датчик пилу GP2Y10 SHARP. Всі дані передавались і реєструвались на наземній станції, яка відображає отримані вихідні значення та показники концентрації ПМ10 у реальному часі.

2.4. Платформи БПЛА

Для розробки системи зондування були обрані як БПЛА із фіксованим крилом, так і мультиротор. Ці літальні апарати працюють принципово різними способами, коли БПЛА з нерухомими крилами перетинають заданий об'єм повітря за певний час, тоді як здатність паріння БПЛА з поворотним крилом дозволяє збирати дані в певних місцях у просторі та часі; однак вони відчують вітер.

Було розглянуто придатність трьох платформ із фіксованим крилом для інтеграції з оптичними або електрохімічними датчиками. Всі БПЛА побудовані з експандованого поліпропілену (ЕПП) та композитних матеріалів, що було

продемонстровано як безпечну та надійну платформу в середовищі гірничої промисловості. Специфікації моделей, розглянутих під час цього дослідження, на рис. 2.3 .

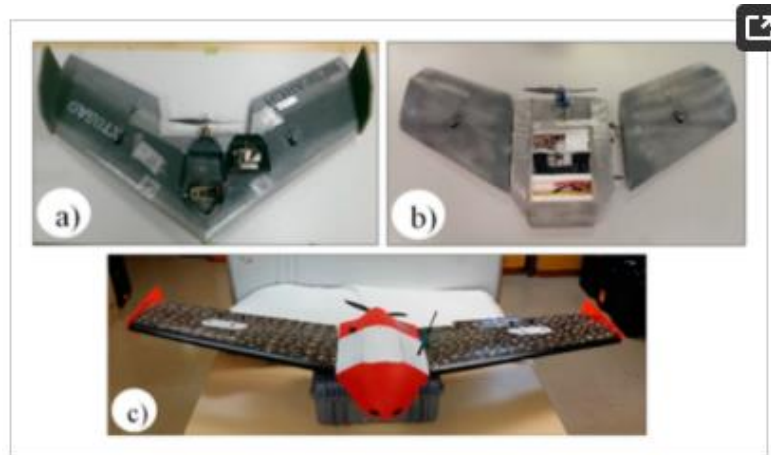


Рис. 2.3. Платформи з БПЛА з фіксованим крилом, (а) Teklite; (б) GoSurv, та (с) Болотна лисиця [15]

Усі БЛА мають низьку кінетичну енергію (<50 джоулів) і низьку швидкість повітря (<60 км / год). Низька кінетична енергія та швидкість покращують безпеку та спрощують ефективність збору даних, але для роботи потрібні досить спокійні умови. Всі вони мають конструкцію штовхача-гвинта, що забезпечує доступ до чистого повітряного потоку для датчиків. Автопілот папарацці, що використовується на Teklite та GoSurv, фіксує висоту, координати платформи, швидкість та напрямок. Вони також оцінюють швидкість та напрямок вітру за різницею відгуку. Автопілот платформи Swampfox реєструє швидкість руху за допомогою трубки Піто, а також швидкість та напрямок руху за допомогою GPS. Дані про швидкість повітря та геолокацію беруться з телеметрії автопілота, яка є невід'ємною частиною всіх малих операцій БПЛА.

Teklite був обраний найкращою платформою для такого типу випробувань, що проводиться завдяки його портативності, простоті інтеграції датчиків, успішним льотним випробуванням, невеликій вазі та низькій (<100

футів) цільовій висоті польоту. Управління БПЛА здійснюється за допомогою наземної станції управління. План польоту попередньо завантажується з наземної станції, яка відображає параметри польоту БПЛА, маршрут польоту та показники забруднення атмосфери в режимі реального часу. План польоту також може бути змінений вручну за допомогою ручного радіопередавача шляхом зміни параметрів через наземну станцію.

БПЛА можна здійснювати на польоті з 1,5 км від наземної станції управління. Погодні умови (швидкість та напрямок вітру, температура тощо) використовуються для попереднього планування шляху польоту БПЛА, щоб простежити та охарактеризувати вибуховий шлейф. За потреби траєкторію польоту можна змінити та завантажити на наземну станцію на основі спостережень після вибухів. Безпілотник може літати понад 35 м над рівнем землі як фактор безпеки, щоб уникнути зіткнення з деревами або інфраструктурою.

Для запису показань нижче 35 м над рівнем землі використовували мультироторну платформу. Система була розроблена для сільськогосподарських та моніторингових обстежень. На рис. 2.4 показано квадрокоптер, інтегрований з модульним датчиком пилу. Багатороторна платформа має середній час польоту 20 хв і загальну вагу 2,5 кг (з батареями). Модульний датчик пилу мав загальну вагу 150 г і розміщувався всередині фанерного корпусу.



Рис. 2.4. Вбудований квадрокоптер та модульна система пилових датчиків [16]

2.5 Стендове тестування оптичних датчиків

Газова камера (рис. 2.5), була побудована для того, щоб піддавати вузол датчика різній концентрації частинок і порівнювати показання з каліброваним пристроєм контролю пилу - Dusttrak 8520. Dusttrak має час відгуку 1 с, роздільна здатність 0,001 мг / м³ і здатний контролювати PM10 та PM2.5. Дим від стандартних ароматичних паличок використовувався як повітряне джерело твердих частинок. Датчик Samsung виробляв низький коефіцієнт кореляції (R^2) 0,5 і тому вважався непридатним варіантом для інтеграції модуля контролю пилу та БПЛА.

Випробування на PM10 та PM2,5, де проводились для датчика пилу SHARP. Початковий тест збору даних був використаний для кореляції вихідних значень, отриманих від датчика, тобто напруги, модифікованої поглинанням світла приймача, зі значеннями, зареєстрованими Dusttrak.

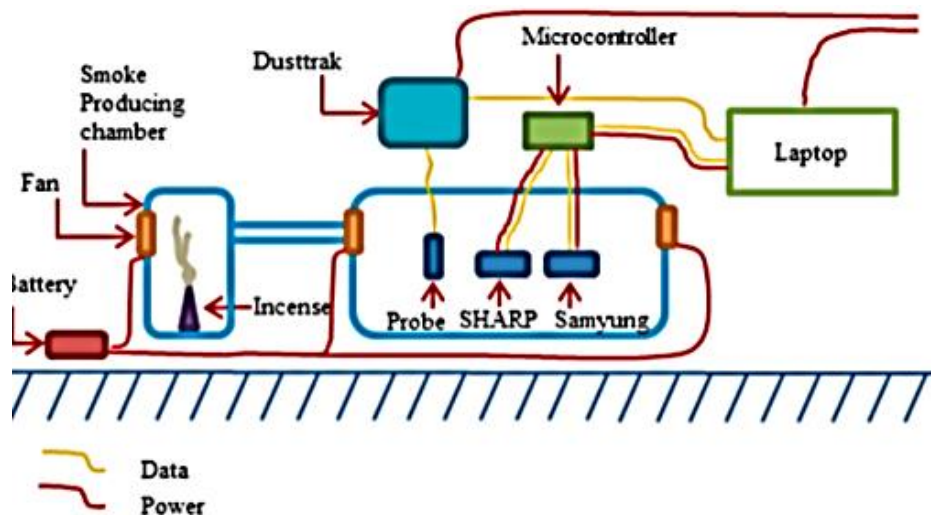


Рис. 2.5. Газова камера для тестування та калібрування датчика [16]

РОЗДІЛ 3

СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ЗА ПИЛОМ

3.1 Система моніторингу за пилом Plug and Play

Для моніторингу пилу в середовищі що містить гас розроблена розподілена мережу вузлів, яка складається з розумних датчиків, які виявляють пил. Така мережева конструкція повинна бути масштабованою, щоб у будь-який час можна було включити додаткові вузли. Кожен вузол повинен працювати як пристрій Plug and Play.

За допомогою мікроконтролерів, вбудованих у кожен вузол, кожен датчик може завантажувати результати вимірювань безпосередньо на сервер усередині мережі. Для того, щоб зберегти високу сумісність між датчиковою мережею та відповідними вимогами мережевого протоколу, існує стандарт IEEE 1451 який слід використовувати для забезпечення загального інтерфейсу між датчиком та зовнішньої мережі, незалежно від мережевих протоколів.

Завдяки роботі в мережі та впровадженню масиву датчиків ми отримуємо кілька переваг, таких як покриття території та зв'язок. Розподілена мережа, що включає розріджені властивості мережі, дозволить мережі сенсорів охоплювати більшу географічну область без негативного впливу на загальну вартість мережі. Всі вузли повинні передавати інформацію через мережу на головний сервер для обробки та запису в база даних інформація про моніторинг. На основі налаштованого рівні прийняття пилу на сервері, може спрацьовувати сигнал тривоги з сервера і відправляти назад через мережу на відповідні пристрої.

3.2 Архітектура системи Plug and Play

Для вимірювання та контролю рівня пилу пропонується розподіл декількох вузлів від $N1$ до Nn . Кожен вузол - це розумний датчик, що працює в

режимі Plug-and-Play, і кожен вузол здійснює зв'язок із сервером через бездротову мережу за допомогою стандарту IEEE 1451.5-802.11 [17]. На рис.3.1. зображено блок - схему датчику пилу.

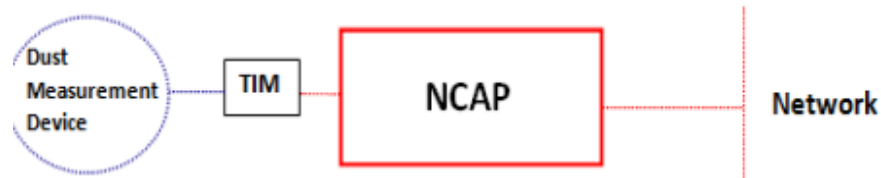


Рис. 3.1. Смарт-датчик пилу [17]

Цей стандарт дозволить сумісним датчикам та пристроям здійснювати бездротовий зв'язок, один з одним. В даний час IEEE працює над трьома різними стандартами, 802.11, Bluetooth та Zigbee [18]. Сервер отримує інформацію моніторингу з розподіленої мережі інтелектуальних датчиків і обробляє ці дані за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення. На основі налаштованих користувачем порогових значень сервер не буде вживати жодних дій, а записувати дані для статистичних цілей, або надсилати сигнал іншим пристроям для виконання конкретних завдань, таких як відключення повітряної пастки або активація повітря системи рециркуляції, якщо встановлені пороги були перевищені до критичного рівня. Це залежить від конкретного застосування, для якого використовується мережа датчиків виявлення пилу.

Кожен вузол з'єднується з розумним датчиком, а саме, пристроєм для виявлення пилу, моделлю інтерфейсу перетворювача (TIM) та процесором додатків, що підтримує мережу (NCAP), як показано на рис. 3.1. МІП (модуль інтерфейсу перетворювача) - це модуль, що містить інтерфейс, кондиціонування сигналу, аналого-цифровий та цифро-аналоговий перетворення, і в багатьох випадках він також містить перетворювач. Складність МІП може варіюватися від окремого датчика або виконавчого механізму до модуля, що містить безліч перетворювачів, включаючи як датчики, так і виконавчі механізми.

NCAP - це апаратне та програмне забезпечення, яке забезпечує функцію шлюзу між МІП і користувацькою мережею або процесором хосту (канал перетворювача). Стандарт визначає інтерфейс зв'язку між NCAP або процесором хосту та одним або декількома МІП. NCAP або хост-процесор управляє МІП за допомогою виділеного носія цифрового інтерфейсу. NCAP є посередником між МІП та цифровою мережею вищого рівня. NCAP може також надавати місцеву розвідку.

На рис. 3.2 показано реалізацію бездротової сенсорної мережі (WSN) на базі IEEE 1451.0 та 1451.5-802.11 з використанням датчиків IEEE 1451.2. Цей WSN складається з одного вузла NCAP та одного вузла WTIM. Датчик IEEE 1451.2 підключений до WTIM через послідовний порт.

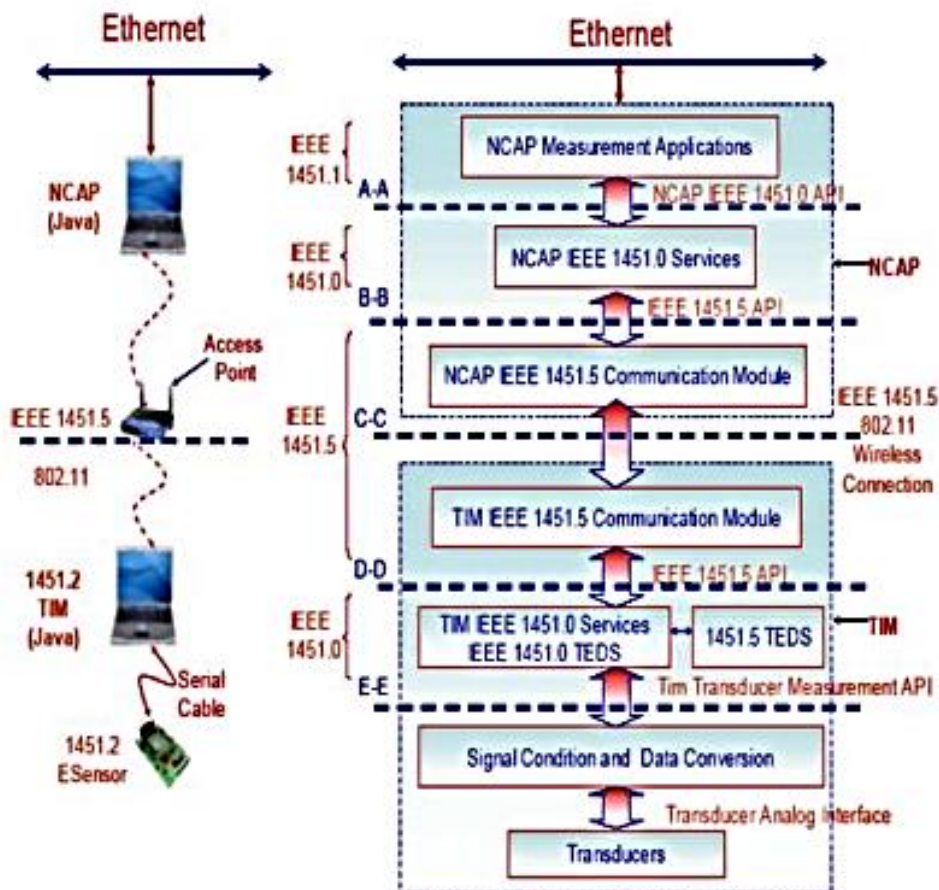


Рис. 3.2. WSN на основі IEEE 1451.0 та 1451.5-802.11 [19]

NCAR може бездротово спілкуватися з ВМІП через протоколи IEEE 1451.0 та 1451.5, використовуючи моделі зв'язку клієнт-сервер та видавець-передплатник. Зв'язок клієнт-сервер та видавець-передплатник між двома вузлами може бути реалізований за допомогою протоколу управління передачею, Інтернет-протоколу (TCP / IP) та протоколу управління передачею, протоколу користувачьких датаграм (TCP / UDP) відповідно.

В системі є можливість інтегрувати вузол інтелектуального датчика пилу в мережу інтелектуальних датчиків, як показано на рис. 3.3, від Вузла 1 до Вузла N, відповідно до вимог програми та кількості необхідних датчиків. Програмне забезпечення моніторингу сервера може бути реалізоване на мові програмування Java для повної гнучкості та сумісності.

Використовуючи Java, система матиме перевагу у переносимості, маючи стандартизовані бібліотеки, що забезпечують загальний спосіб доступу до особливостей хоста, таких як потокові потоки, мережевий доступ та автоматичне управління пам'яттю.

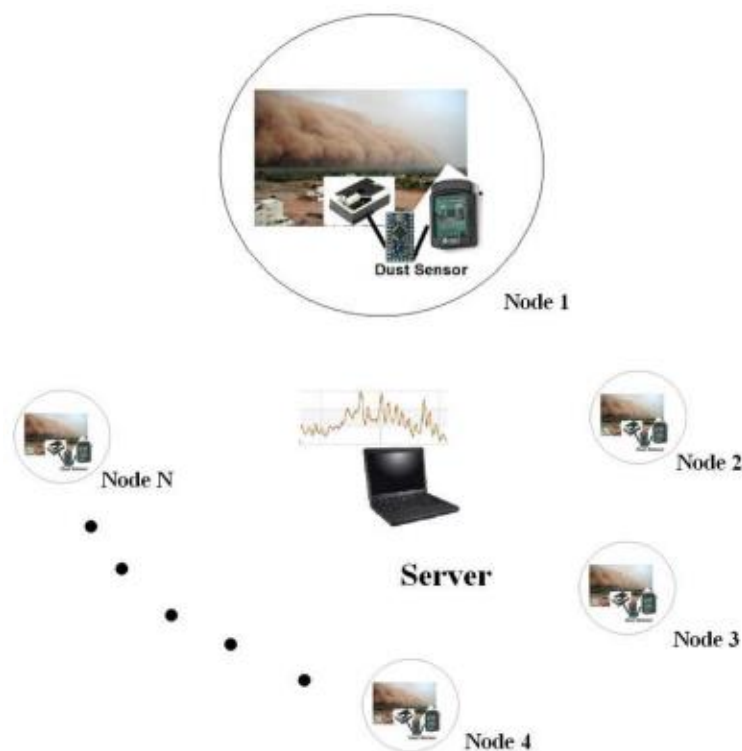


Рис. 3.3. Мережа моніторингу пилу. [20]

3.3 Експериментальні результати системи Plug and Play

Кожен вузол був реалізований з використанням датчика пилу Sharp GP2Y1010AU0F, який базується на оптичному принципі. Датчик був прив'язаний до пристрою Sun SPOT (Sun Small Programmable Object Technology), який є бездротовою мережею бездротового сенсора з відкритим вихідним кодом (WSN), розробленою Sun Microsystems. Пристрій побудований за стандартом IEEE 802.15.4 та на віртуальній машині Squawk Java. Це дозволило використовувати мову програмування Java для управління отримання даних із датчика Sharp. Зв'язок від Sun Spot до сервера гарантував стандарт бездротового з'єднання.

Експериментальні результати були отримані з використанням декількох видів пилу: піщаного пилу з високою зернистістю, гіпсового пилу та копильної золи. Інший детектор пилу був використаний як еталонний, заснований на гравіметричному принципі «D-RC80 Автоматичний пристрій відбору проб для вимірювання гравіметричного пилу», що використовується як еталонна вимірювальна система. Вихід датчика надсилається через Sun Spot на сервер, використовувалась програма LiveGraph для побудови результатів, отримані результати зображені на рис.3.4.

Під час експериментальної фази враховувались сучасні методи випробувань, такі як вони описані у спеціальній літературі.

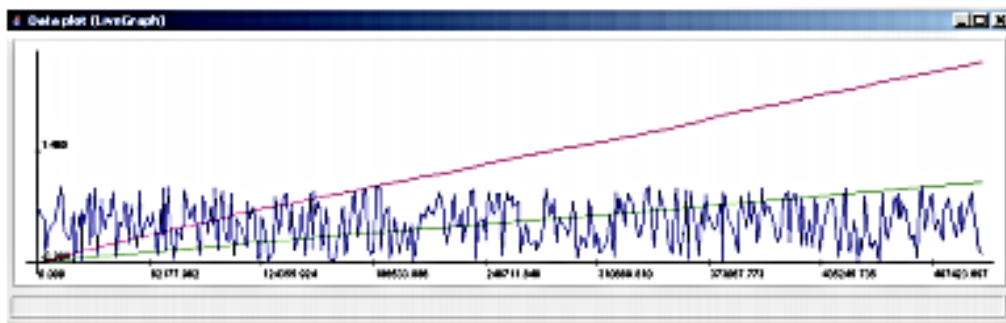


Рис.3.4. Експериментальний графік системи в програмі LiveGraph [21]

3.4 Система аналізу пилу на основі технології ZigBee

У системі використовуються модуль датчика пилу та модуль збору температури та вологості. Збір інформації про концентрацію пилу, температуру та вологість повітря в режимі реального часу, передачу до хоста комп'ютера за допомогою бездротової системи передачі однокіпного комп'ютера (SCM), аналіз даних, обчислення та статистику здійснює хост-комп'ютер. Мережа бездротових датчиків, заснована на технології ZigBee з низьким енергоспоживанням, низькою вартістю та високою стабільністю, використовується для контролю концентрації пилу, температури та вологості повітря.

ZigBee використовується для типової періодичної, періодичної та низької тривалості реакції передачі даних. Принципова схема системи показана на рис.3.5.

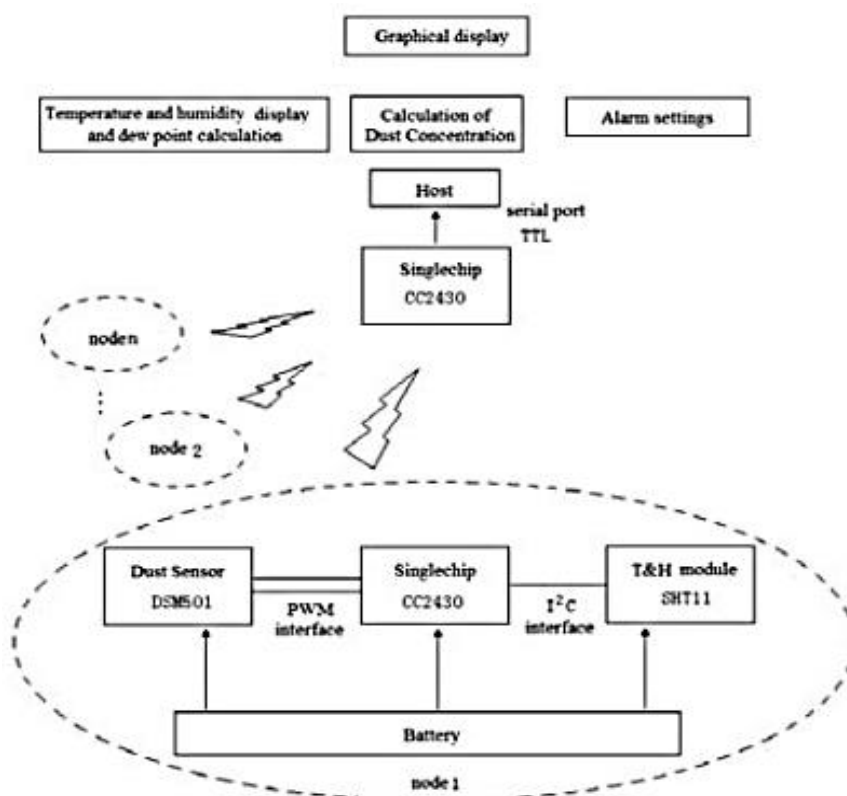


Рис.3.5. Принципова схема системи аналізу пилу на основі технології ZigBee [22]

3.5 Принцип дії системи аналізу пилу ZigBee

Основне обладнання системи включає датчик пилу DSM501, однокристальний комп'ютер CC2430. Однокристальний мікрокомп'ютер CC2430 CC2430 MCU в основному реалізує бездротову передачу між модулем датчика та хостом комп'ютера. Частота передачі розрахована на 2,4 ГГц. Зовнішній вигляд структури ланцюга CC2430s показаний на рис.3.6.

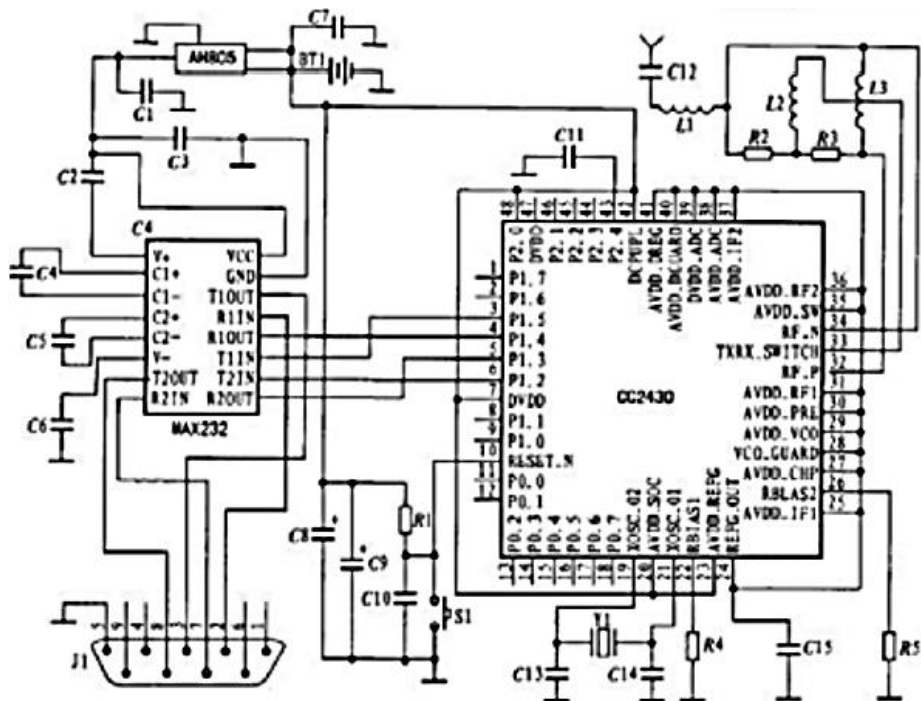


Рис.3.6. Схема електрична принципова системи моніторингу пилу на основі технології ZigBee [23]

Процес роботи системи такий:

- зв'язок між датчиком пилу, датчиком температури та вологості та інтерфейсом MCU;
- встановлення зв'язку між приймачем MCU та ПК (через інтерфейс USB);
- отримуючи MCU і ПК-хост починають працювати, підготування до побудови бездротових мереж і приєднання до інтерфейсних вузлів, після встановлення з'єднання;

- інформація про вузол повертається до хоста ПК;
- відкриття хост ПК програмне забезпечення та чекати передачі даних;
- увімкнення обладнання для придбання інтерфейсу;
- HostХост ПК отримує інформацію про адресу інтерфейсного обладнання через приймаючий MCU, бездротова мережа передачі встановлена;
- SoftwareСистемне програмне забезпечення аналізує та обчислює отриману інформацію про концентрацію пилу, температуру та вологість та відображає їх із графічними результатами.

Принцип DSM501 заснований на підрахунку часток. Принцип дії датчика пилу показаний на рис.3.7.

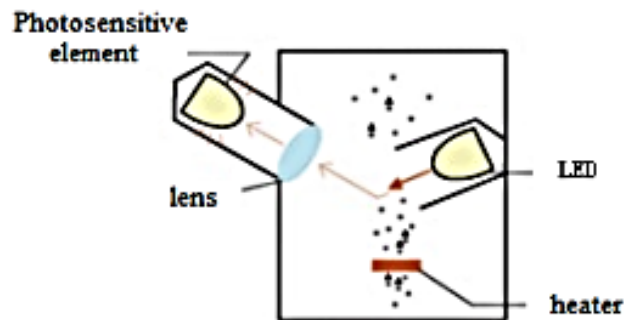


Рис.3.7. Принцип роботи датчика пилу [24]

Сигнал PWM показаний на рис.3.8. Форма сигналу ШІМ-сигналу, що виводиться датчиком за 30 секунд (цикл вимірювання), показана на малюнку. Взаємозв'язок між низькою швидкістю імпульсу датчика пилу та кількістю частинок пилу є лінійною. Характерна крива представлена на рис. 3.9, Низька швидкість імпульсу = $(LT / UT) \times 100\%$. обчислюється до тих пір, поки обчислюється низька частота імпульсів за одиницю часу і кількість виявлених частинок може бути отримана, посилаючись на характеристичну криву [25].

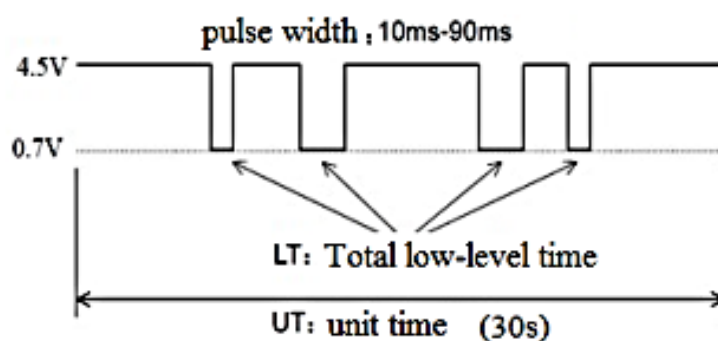


Рис.3.8. ШІМ-хвильова форма датчика пилу [26]

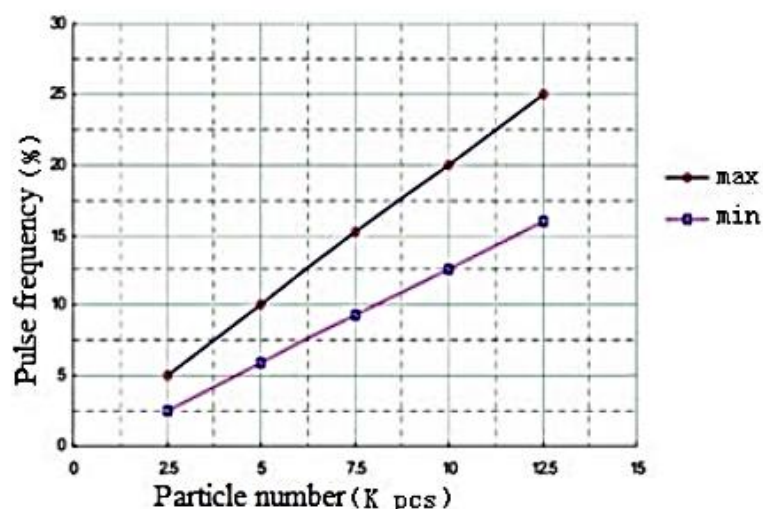


Рис. 3.9. Характерна крива датчик DSM501 [27]

Датчик DSM501 може виявляти частинки діаметром більше 1 мкм. Він охоплює в повітрі сигарети, пил, грибки, пилок тощо. Вбудований датчик нагрівача, може автоматично вдихати повітря. Він має компактні розміри, малу вагу та простий в установці та використанні.

Особливості DSM 501:

- виявлення пилу, пилку та частинок вниз 1 мкм;
- індивідуальна чутливість для ефективного управління залежно від застосування;
- відмінна довгострокова надійність та просте обслуговування;
- компактний розмір;
- ШІМ-вихід.

ВИСНОВКИ

Волоконно-оптичні датчики успішно протестовані для вимірювання концентрації пилу в різних сферах застосування. Вони були класифіковані на три групи одиночних, подвійних та пучок оптичних волокон. Вони отримують ряд переваг перед звичайними датчиками пилу. Цей тип датчиків має величезний потенціал для подальшого розвитку для використання в гірничих роботах для вимірювання концентрації пилу.

Використовуючи розумну сенсорну мережу, ми можемо контролювати та вимірювати пил у будь-якому середовищі, міському чи промисловому. Покриття зони мережі моніторингу пилу можна розширити залежно від потреб, без будь-якого негативного впливу на загальну вартість мережі. Кожен пилочутливий пристрій може фокусувати увагу на певній ділянці та керуватися ним як єдине ціле, або, в свою чергу, його можна використовувати лише як одну точку присутності в даній області, що сприяє загальній точності вимірювання. Чим більше вузлів ми використаємо для мережі моніторингу пилу, тим більшою буде точність зібраної інформації. Взаємодія людини значно зменшиться завдяки використанню такої мережі. Крім того, порівняно з спостереженнями людей, впровадження інтелектуальної сенсорної мережі є більш гнучким, коли йдеться про небезпечні та ворожі середовища, куди люди не можуть проникнути, дозволяючи доступ до інформації, яка раніше була недоступна з такої близькості.

Планування роботи датчиків можна отримати, дозволивши вузлам датчиків змінювати вимоги до зв'язку у відповідь на виявлені умови мережі та події. Оптичний датчик, який ми використовували, може легко стати вузлом у багатовузловій мережі та підключитися до сервера через бездротову мережу. З досвіду вже існуючих пристроїв можна очікувати, що в найближче десятиліття з'явиться велика кількість систем моніторингу всіх фізичних явищ із великим застосуванням у секторі охорони здоров'я людей, промисловому секторі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Noble, T. L., Parbhakar-Fox, A., Berry, R. F., and Lottermoser, B., "Mineral Dust Emissions at Metalliferous Mine Sites." *Environmental Indicators in Metal Mining* 281-306 (2017).
2. Erol, I., Aydin, H., Didari, V., and Ural, S., "Pneumoconiosis and quartz content of respirable dusts in the coal mines in Zonguldak, Turkey." *International Journal of Coal Geology* 116–11726-35 (2013).
3. Laney, A. S. P. and Weissman, D. N. M. D., "Respiratory Diseases Caused by Coal Mine Dust." *Journal of Occupational & Environmental Medicine* 56 Supplement(10S), S18-S22 (2014).
4. Petsonk, E. L., Rose, C., and Cohen, R., "Coal mine dust lung disease. New lessons from an old exposure." *American journal of respiratory and critical care medicine* 187(11), 1178-1185 (2013).
5. Sierakowski, M., Domański, A. W., Woliński, T. R., and Rutkowska, O., "Fiber-optic dust sensor for monitoring of transparent and semi-transparent media," *Proceedings of SPIE. The International Society for Optical Engineering*, 310-313 (2004).
6. Sick. DUST MEASURING DEVICES. 20/02/2017]; Available from: https://www.sick.com/media/dox/9/39/639/Product_catalog_Dust_measuring_devices_en_IM0052639.PDF.(2021).
7. Van Ommen, J. R. and Mudde, R. F., "Measuring the gas-solids distribution in fluidized beds - A review." *International Journal of Chemical Reactor Engineering* 61-29 (2008).
8. Rundqvist, R., Magnusson, A., Van Wachem, B. G. M., and Almstedt, A. E., "Dual optical fibre measurements of particle concentration in gas/solid flows." *Experiments in Fluids* 35, 572-579 (2003).
9. Herbert, P. M., Gauthier, T. A., Briens, C. L., and Bergougnou, M. A., "Application of fiber optic reflection probes to the measurement of local particle

velocity and concentration in gas—solid flow." *Powder Technology* 80(3), 243-252 (2004).

10. Bergougnoux, L., Firpo, J. L., and Misguich-Ripault, J., "Optical fiber sensor for measuring high particle concentrations." *Powder Technology* 105(1-3), 413-417 (2009).

11. Bellino, I., Bergougnoux, L., Misguich-Ripault, J., and Firpo, J.-L., "Particle size effects on an optical fiber sensor response." *Powder Technology* 11568-74 (2001).

12. Liu, J., Grace, J. R., and Bi, X., "Novel multifunctional optical-fiber probe: I. Development and validation." *AIChE Journal* 49(6), 1405-1420 (2003).

13. Wei-xian, H., "Model GQY-1 optical fibre type densimeter." *control and instruments in chemical industry* (01), (2006).

14. Brenci, M., Guzzi, D., Mencaglia, A., and Mignani, A. G., "Fibre-optic smoke sensor." *Sensors and Actuators B: Chemical* 7(1), 780-783 (2002).

15. [15] Floridia, C., Alves, L. R., Bassan, F. R., Juriollo, A. A., Borin, F., and Souza, A. R. C., "Brush wear and dust accumulation fiber-optic sensor system for synchronous compensators online monitoring," *Proceedings of SPIE The International Society for Optical Engineering*, (2013).

16. Nova, S. R., Krol, S., and De Lasa, H. I., "CREC fiber-optic probes for particle velocity and particle clustering: Design principles and calibration procedures." *Industrial and Engineering Chemistry Research* 43(18), 5620-5631 (2004).

17. Zhong, X. X. and Li, J. S., "Optical fiber sensor for dust concentration measurement," *Proceedings SPIE 0838, Fiber Optic and Laser Sensors V*, , San Diego, CA, 285-287 (2008).

18. Tran, N. T., Campbell, C. G., and Shi, F. G., "Study of particle size effects on an optical fiber sensor response examined with Monte Carlo simulation." *Applied Optics* 45(29), 7557-7566 (2006).

19. Jacob Fraden, "Handbook of modern sensors physics , designs and applications", Springer, Third edition, 2004.

20. Grard C.M. Meijer, "Smart sensor systems", Delf University of Technology, 1st Edition, 2008, Netherlands.
21. Occupational safety and health administration (OSHA), the Massachusetts Office of the State Fire Marshall and the Springfield Arson and Bomb Squad, "Joint Foundry Explosion Investigation Team Report.", Springfield, MA, Safety and Health Information Bulletin, 31.07.2005.
22. IEEE Instrumentation and Measurement Society "IEEE 1451.5, Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators– Wireless Communication and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats", TC-9, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, N.Y. 10016.
23. Richard Bono, Mike Dillon, Kevin Gatzwiller and David Brown, "New developments in multichannel test systems, sound and vibration magazine", August 2009.
24. Pan Fu, A.D. Hope and G.A.King, "An intelligent tool condition monitoring system", The 52nd meeting of the society for machinery failure prevention technology, pp.397-406 (2008).
25. Sun SPOT Programmer's Manual rel. 6.0, Sun Labs, November 2010.
26. Sheet No.: E4-A01501EN GP2Y1010AU0F Compact Optical Dust Sensor, SHARP Corporation, 2006.
27. Jong-Won Kwon; Yong-Man Park; Sang-Jun Koo; Hiesik Kim, "Design of Air Pollution Monitoring System Using ZigBee Networks for Ubiquitous-City", Convergence Information Technology, 2007.