

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
КОНОТОПСЬКИЙ ІНСТИТУТ

Кафедра електронних  
приладів і автоматики

Кваліфікаційна робота бакалавра

**МІКРОПРОЦЕСОРНИЙ МОДУЛЬ КЕРУВАННЯ СИСТЕМАМИ  
ЛОКАЛІЗАЦІЇ ВИБУХІВ**

Студент гр. ЕП-61

Путря Д.А.

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

Бурик І.П.

Науковий керівник,  
к.т.н., ст. викладач,.

Динник О.Д.

Конотоп 2020

## РЕФЕРАТ

Об'єктом дослідження даної роботи є мікропроцесорна система керування комплексом гасіння вибухів.

Мета роботи полягає у розробленні концепції побудови сенсора пилу на основі мікроконтролера MSP430F2012 компанії Texas Instruments. В основу роботи покладено визначення ступеня прозорості повітря в області між інфрачервоними світлодіодом і фотодіодом. При перевищенні заданого рівня система повинна генерувати керуючий сигнал.

Розроблені та апробовані протипилові заходи здатні підвищити стан безпеки на вугільних підприємствах, але практична відсутність ефективного контролю пилового фактору у виробках призводить до несвоєчасності проведення та недостатньої обґрунтованості цих заходів. Таким чином, задача контролю пилових вибухобезпеки гірничих виробок є актуальною. В роботі розглядаються питання розробки апаратно-програмного комплексу для вивчення проблем детектування газо-пилових сумішей. У робочій камері встановлюються LED-світлодіод та фотоприймач. Блок керування формує сигнал спрацьовування, коли виявляється істотне поглинання випромінювального світла, що випромінює світлодіод.

Робота складається із вступу, 3 розділів і висновків. Загальний обсяг роботи становить 34 сторінки, в тому числі 11 рисунків, 1 таблиця і список літератури з 21 найменування.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** МІКРОКОНТРОЛЕР, СИСТЕМИ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ВИБУХІВ, СВІТЛОДІОД, ФОТОПРИЙМАЧ.

## ЗМІСТ

	стор.
<b>ВСТУП</b> .....	4
<b>РОЗДІЛ 1 ОБСТЕЖЕННЯ НОВІТНІХ ВИБУХОЗАХИСНИХ СИСТЕМ</b> .....	5
1.1 Застосування пристроїв пиловибухобезпеки.....	5
1.2 Комплекс автоматичного запобігання аварійним ситуаціям.....	7
<b>РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ПОРЯДКУ УПРАВЛІННЯ СУКУПНІСТЮ ГАСІННЯ ВИБУХІВ</b> .....	10
2.1 Концепція структури виробу .....	10
2.2 Розгляд елементної бази.....	11
2.3 Функціональна характеристика приладу.....	13
<b>РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ ТЕМПЕРАТУРНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СВІТЛОДІОДІВ ТА ФОТОПРИЙМАЧІВ</b> .....	18
3.1 Температурні залежності світлодіода	
3.2 Лабораторне вивчення температурних залежностей світлодіода	
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	32
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b> .....	33

## ВСТУП

Вибухи вугільного пилу становлять близько 25% від загальної кількості вибухів на вугільних шахтах України. За своєю потужністю та вагою наслідків вони значно перевищують більш часті вибухи та спалахи метану. За останні роки, незважаючи на комплекс заходів, спрямованих на зниження запиленості гірничих виробок, кількість великих аварій на вугільних підприємствах за участю вибухів пилу зросло. Як наслідок, рівень травматизму від вибухів значно перевищив відповідні показники в індустріально розвинутих країнах.

Небезпеку вибуху зумовлює вугільний пил, що відклався на поверхні підземної виробки. В осілому стані він вибухнути не може, але через різке збурення повітря, викликане, наприклад, відносно слабким вибухом метану, осіла пилова маса здіймається і створює вибухонебезпечну ситуацію. Таким чином, запобігти вибухам вугільного пилу можливо шляхом своєчасного проведення заходів, спрямованих на боротьбу з осілим пилом.

Розроблені та апробовані протипилові заходи здатні підвищити стан безпеки на вугільних підприємствах, але практична відсутність ефективного контролю пилового фактору у виробках призводить до несвоєчасності проведення та недостатньої обґрунтованості цих заходів. Таким чином, задача контролю пиловибухобезпеки гірничих виробок є актуальною.

Розробити сенсор пилу на основі мікроконтролера MSP430F2012 компанії Texas Instruments. В основу виявлення диму покласти визначення ступеня прозорості повітря в області між інфрачервоними світлодіодом і фотодіодом. При перевищенні заданого рівня система повиненна генерувати керуючий сигнал.

## РОЗДІЛ 1

### НОВІТНІ ВИБУХОЗАХИСНІ СИСТЕМИ

#### 1.1 Застосування пристроїв пиловибухобезпеки

Портативні вимірювачі для контролю пиловибухобезпеки не можуть бути достатньо ефективними, оскільки можуть проводитись лише періодично. Для постійного контролю необхідно застосовувати стаціонарну апаратуру. Зважаючи на існування стаціонарних датчиків пиловідкладення і запиленості повітря, а також розвиток ЕОМ і мікропроцесорної техніки, вирішення задачі контролю можливе шляхом розробки на їх базі системи контролю пиловибухобезпеки гірничих виробок шахт (СКПГВ). Застосування вказаної системи дає можливість підвищити безпеку виробок за пиловим фактором, за рахунок безперервного контролю, оперативного прогнозування стану пиловибухобезпеки гірничих виробок і своєчасного планування протипилових заходів. З іншого боку, СКПГВ дозволить знизити витрати на знепилення і більш повно використовувати ефект від проведення протипилових заходів.

Відповідно до вимог Правил безпеки на шахтах, що розробляють пласти небезпечні за вибухами вугільного пилу, поряд із заходами щодо їх попередження, повинна застосовуватися система пиловибухозахисту, призначена для локалізації і, отже, запобігання поширенню виниклого вибуху по гірських виробках на великі відстані.

Для вибухозахисту мережі гірничих виробок у світовій практиці широко застосовуються так звані пасивні водяні і сланцеві заслони, що спрацьовують під впливом ударної хвилі вибуху. Такі заслони досить громіздкі, здатні гасити вибухи тільки на значній відстані від вогнища, що не виключає важкі наслідки. Так, за даними, гасіння було найбільш ефективним, якщо час, що протікає між початком примусового розпилення і приходом фронту полум'я в зону заслону становило 200-300 м/с. При цьому, швидкість полум'я знаходилася в межах 100-500 м/с. При

вибухах рудничного газу з великими швидкостями поширення заслони з примусовими спрацьовуванням були неефективні.

В даний час ведуться інтенсивні розробки автоматичних систем гасіння вибухів метану та вугільного пилу. Так, у Німеччині створені автоматичні заслони в шахті "Тремон" і BVS, а також "Mark II" в Англії.

Автоматичні заслони відрізняються один від одного конструктивними рішеннями виконавчого механізму - вибухопридушуючі пристрої, зумовленими особливостями конкретних потенційних джерел вибуху і складом вибухової суміші, які в свою чергу визначають вибір вибухопридушуючі речовини і джерела енергії для його розпилення.

У нашій країні в 1989 р була створена і успішно пройшла приймальні випробування на шахті "Радянська" ПО "Макиїввугілля" автоматична система СЛВА, призначена для гасіння вибухів метану і вугільного пилу в початковій стадії виникнення по мережі гірничих виробок шахти в цілому. В цей же час було розроблено пристрій автоматичного взривоподавлення на прохідницьких комбайнах вибіркової дії АВПК.

У роботах наведені основні вимоги до автоматичних систем гасіння спалахів метану і вугільного пилу в початковій стадії їх виникнення на підставі експериментальних даних і теоретичних оцінок.

Так, однією з основних вимог до таких систем є висока швидкодія, тобто малий час створення вибухопридушуючі середовища. Іншим, не менш важливою вимогою, є вимога високої безпеки у разі помилкового спрацьовування автоматичної системи як відносно ураження людини газопиловим потоком, так і щодо займання пилометаноповітряної суміші розпеченими продуктами джерела енергії виконавчого пристрою. Висока швидкодія обумовлює необхідність розпилення вибухогасільної речовини з великими швидкостями, що пов'язано з небезпекою травмування робітників, які опинилися в зоні дії пристрою гасіння. Зниження ж швидкості створення вибухогасільного середовища збільшує інерційність автоматичної системи, тим самим не буде забезпечено гасіння швидкозростаючих вибухів.

Розроблені в нашій країні системи СЛВА, АВПК і СВША за технічними характеристиками перевершують відомі зарубіжні зразки автоматичних систем як за вимогами безпеки, так і за умовами гасіння вибухів метану і вугільного пилу в початковій стадії розвитку, незалежно від потужності джерела вибуху.

## 1.2 Функції вибухопридушуючих пристроїв

Складовою частиною зазначених вище систем є вибухопридушуючий пристрій. Воно виконує наступні функції: під дією тиску порохових газів порошкоподібний інгібітор викидається з контейнера в бік вогнища займання, придушуючи його, і локалізує фронт полум'я, запобігаючи поширенню вибуху з вироблення.

Деякий час для захисту від вибухів у мережі гірничих виробок широко застосовувалися так звані пасивні водяні і сланцеві заслони, що спрацьовують під впливом ударної хвилі вибуху. Такі заслони досить громіздкі, здатні гасити вибухи лише на значній відстані від осередку, що не виключає тяжких наслідків. При цьому гірники в межах аварійної ділянки травмуються. Крім того, пасивні заслони не забезпечують надійну локалізацію спалахів і вибухів метаноповітряної суміші, а також займань метану в шарових скупченнях і в куполах через відсутність у цих випадках досить інтенсивної ударної хвилі.

Забезпечити надійну безпеку персоналу шахт по всій мережі гірничих виробок можна шляхом гасіння спалахів метану безпосередньо в зоні їх осередків. Для цього потрібні спеціальні засоби з примусовою подачею гасильного матеріалу восередок спалаху (вибуху) у момент його виникнення.

Такі розробки вже існують. Розглянемо деякі з них. Наприклад, у ЦНДІ хімії та механіки (ЦНДІХМ, м. Москва) в рамках конверсійної програми було розроблено комплекс автоматичного запобігання аварійним ситуаціям (КАЗАС).

Комплекс складається з двоканального датчика полум'я і вибухоподавлюючого пристрою, який містить контейнер з порошкоподібним інгібітором та енергетичний вузол. Вибухоподавлюючий пристрій дозволяє практично миттєво (за час менше 0,1 секунди) подавити вибух на самій первинній його стадії, коли щойно сталося

загоряння метаноповітряної суміші і не настав процес переходу горіння у вибух. Комплекс встановлюється стаціонарно на кріплення гірничих виробок, а також на пересувних пристроях на монорейці або прохідницьких і транспортних агрегатах.

В наш час в шахтах Росії та України застосовуються автоматичні системи подавлення вибухів АСВП-ЛВ (Рис. 1.1) та СЛВА. (Рис. 1.2)

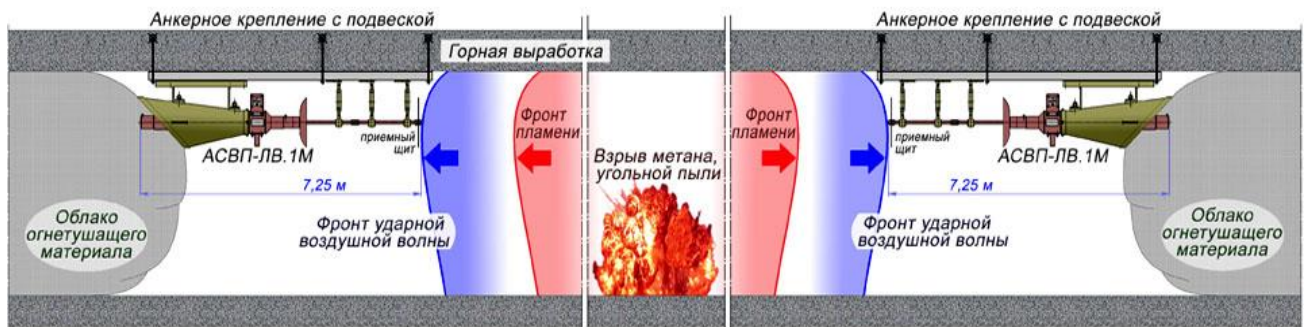


Рис. 1.1 Автоматична система подавлення вибухів(АСВП-ЛВ)

АСВП-ЛВ.1М (АСВП-ЛВ) монтується під покрівлю гірничої виробки за допомогою анкерного кріплення, або за допомогою спеціальної кріпильної конструкції

Пристрій локалізації вибуху складається з пристрою активації, конусоподібного бункера і проміжної камери, заповнених вогнегасним порошком, усередині яких коаксіально розташована робоча порожнина, заповнена стисненим повітрям під високим тиском.

Надалі, автоматична система працює в режимі очікування і приводиться в дію ударною повітряною хвилею (УПВ), утвореної в результаті вибуху метано-пилоповітряної суміші. Від впливу УПВ на приймальний щит відбувається динамічне викидання в простір гірничої виробки вогнегасної матеріалу енергією стисненого повітря (газу), що знаходиться під високим тиском в робочій порожнині системи. В результаті в об'ємі гірничої виробки по всьому її перетину на шляху поширення фронту полум'я формується надійний заслін у вигляді хмари



вогнегасного матеріалу. Цей заслін ліквідує фронт полум'я (гасить його) і припиняє процес поширення вибухів по мережі гірничих виробок.

Автономний командний пристрій (АКУ) з'єднаний з УЛВ і складається з виносних штанг, з'єднувальних муфт і приймального щита.

Основні недоліки даної системи:

- можливість відмов системи в умовах "тихого" вибуху;
- несанкціоноване спрацьовування системи внаслідок механічної дії на неї;
- неповний викид порошку з бункера;
- можливість прогину висувної штанги і приймального щита, що може призвести до відмови системи.

Система СЛВА призначена для придушення вибухів метану і вугільного пилу на початковій стадії їх виникнення в гірських виробках вугільних шахт шляхом подачі інгібітору в зону осередку займання.

Система складається із пристрою придушення вибуху (УПВ), датчика полум'я і блоку сполучення з пускачем. Встановлюється в місцях найбільш ймовірного виникнення вибухів. Контроль працездатності датчика полум'я і пристрою придушення вибуху здійснюється за допомогою локальної індикації.

При експлуатації СЛВА в шахтах були виявлені такі недоліки:

- конструкція вибухоподавлюючого пристрою не усуває утворення в робочому положенні порожнини у верхній частині контейнера, через яку викидаються продукти згорання газогенеруючого заряду, що не забезпечує рівномірність викиду порошку з контейнера, відсутність прориву продуктів згорання, випередження струменя газів і повноту викиду інгібітору із контейнера;
- конструкція газогенеруючого заряду допускає неправильне збирання при перезарядженні УПВ, що призводить до відмови при спрацьовуванні;
- можливість помилкового спрацьовування датчика полум'я при неправильному підключенні або замиканні жил кабелю;

Оскільки система СЛВА була розроблена понад 20 років тому, багато технічних рішень, закладених в її конструкцію, нині є застарілими, і на зміну їй прийшов

комплекс вибухоподавлюючий пневматичний шахтний (КВПШ.1), зовнішній вигляд якого зображено на рисунку 1.2. КВПШ.1 складається з бункера для зберігання інгібітору, балона, розрахованого для зберігання стисненого повітря, мембрани, яка руйнується електродетонатором миттєвої дії, датчиків полум'я, блоку управління і блоку, призначеного для сполучення з пускачем.

Використання розпилювача зі співвісних конічних кілець, що встановлюються на виході контейнера з інгібітором, дозволяє більш рівномірно розподіляти порошок по перетину виробки і зменшити величину ударної хвилі. В якості розпилювального газу використовується азот або повітря, які, знаходячись під тиском 120-150 атмосфер можуть забезпечити зону розпилення до 35м.



Рис. 1.2. Зовнішній вигляд системи КВПШ.1

Датчики полум'я виявляють ІЧ випромінювання спалаху суміші і подають сигнал на активацію вибухоподавлюючого пристрою в залежності від швидкості поширення полум'я. Чутливість датчиків полум'я така, що вони реагують на ядро полум'я діаметром 0,6 м з відстані 10м. Датчик не реагує на джерела освітлення (світильники, фари електровоза та інших машин).

## РОЗДІЛ 2

### РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ КОМПЛЕКСОМ ГАСІННЯ ВИБУХІВ

#### 2.1 Концепція побудови виробу

Сенсори диму є ефективним інструментом протипожежної сигналізації, так як, на відміну від традиційних теплових сенсорів, вони спрацьовують до утворення відкритого полум'я та помітного зростання температури в приміщенні. За рахунок простоти реалізації, широке поширення отримали оптоелектронні сенсори диму(Рис2.1)

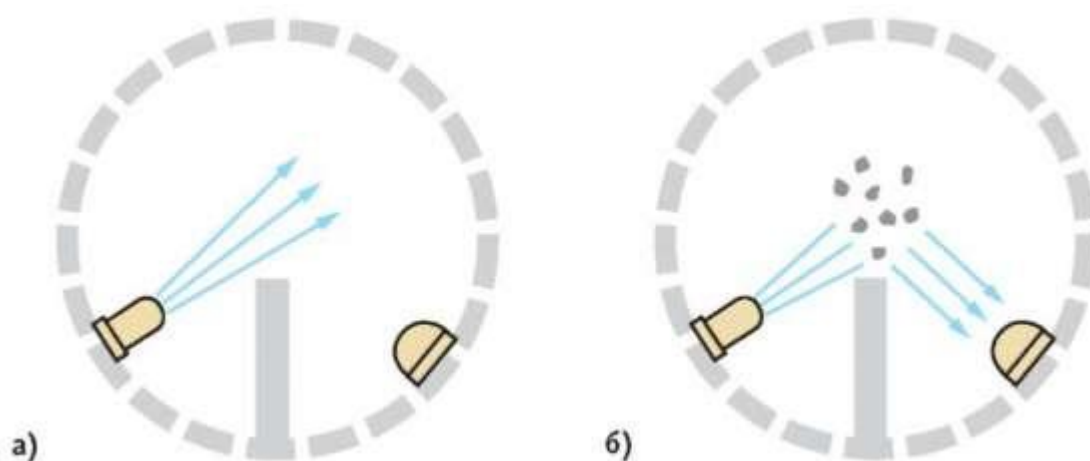


Рис.2.1 А-відсутній дим у димовій камері. Б-дим потрапив у димову камеру

Оптоелектронні сенсори диму складаються з димової камери, в якій встановлені випромінювач світла та фотоприймач. Пов'язана з ними схема формує сигнал спрацьовування, коли виявляється істотне поглинання випромінювального світла. Саме такий принцип дії покладений в основу представленого сенсора пилу.

Наведений датчик використовує живлення від батарейки, тому, з метою збільшення практичності, він повинен в середньому споживати дуже малий струм, обчислюваний одиницями мікроампер. Це дозволить йому протягом декількох років пропрацювати без необхідності заміни батареї живлення. Крім того, у виконавчому

колі передбачається використання звукового випромінювача, здатного розвинути звуковий тиск не менше 85 дБ.

Типовим засобом забезпечення дуже малого споживання енергії пристроєм є його повторно-короткочасний режим роботи, причому тривалість паузи повинна в багато разів перевищувати тривалість активної роботи. У такому випадку середнє споживання буде зводитися до сумарного статичного споживання енергії неактивними компонентами схеми. Реалізувати таку ідею допомагають програмовані мікроконтролери (МК) з можливостями переходу в мікропотужний черговий режим та автоматичного відновлення активної роботи через задані інтервали часу. Таким вимогам повністю відповідає 14-вивідний МК MSP430F2012 з об'ємом вбудованої Flash-пам'яті 2 кбайт. Даний МК після переведення в черговий режим LPM3 споживає струм, рівний всього лише 0,6 мкА. У цю величину також входить споживаний струм вбудованого RC-генератора (VLO) та таймера A, що дозволяє продовжувати відлік часу навіть після переведення МК в черговий режим роботи. Однак даний генератор дуже нестабільний. Його частота в залежності від навколишньої температури може змінюватися в межах 4 ... 22 кГц (номінальна частота 12 кГц). Таким чином, в умовах забезпечення заданої тривалості пауз в роботі датчика, у нього повинна бути закладена можливість калібрування VLO. Для цих цілей можна використовувати вбудований високочастотний генератор - DCO, який відкалібрований виробником з точністю не гірше  $\pm 2,5\%$  в межах температурного діапазону 0 ... 85 °С. В якості елементів оптичної пари, розміщених в димовій камері (SMOKE\_CHAMBER), використовуються світлодіод (СД) та фотодіод інфрачервоного (ІЧ) спектру.

## 2.2 Аналіз елементної бази

Завдяки робочій напрузі МК 1,8 ... 3,6 В та належним розрахунками інших каскадів схеми, досягнута можливість живлення схеми від двох батарей типу ААА. Для забезпечення стабільності випромінюваного світла в умовах живлення не стабілізованою напругою робочий режим СД задається джерелом струму 100 мА,

який зібраний на двох транзисторах Q3, Q4. Дане джерело струму активне, коли на виході P1.6 встановлений високий рівень. У черговому режимі роботи схеми він відключається (P1.6 = «0»), а загальне споживання каскадом ПЧ випромінювача знижується до дуже малого рівня струму витoku через Q3. Для посилення сигналу фотодіода застосована схема підсилювача фотоструму на основі ОП TLV2780. При виборі цього ОП керувалися вартістю та часом встановлення. У даного ОП час встановлення становить до 3 мкс, що дозволило не використовувати підтримувану їм можливість переходу в черговий режим роботи, а замість цього - керувати живленням підсилювального каскаду з виходу МК (порт P1.5). Таким чином, після відключення підсилювального каскаду він взагалі не споживає ніякого струму, а досягнута економія струму становить близько 1,4 мкА.

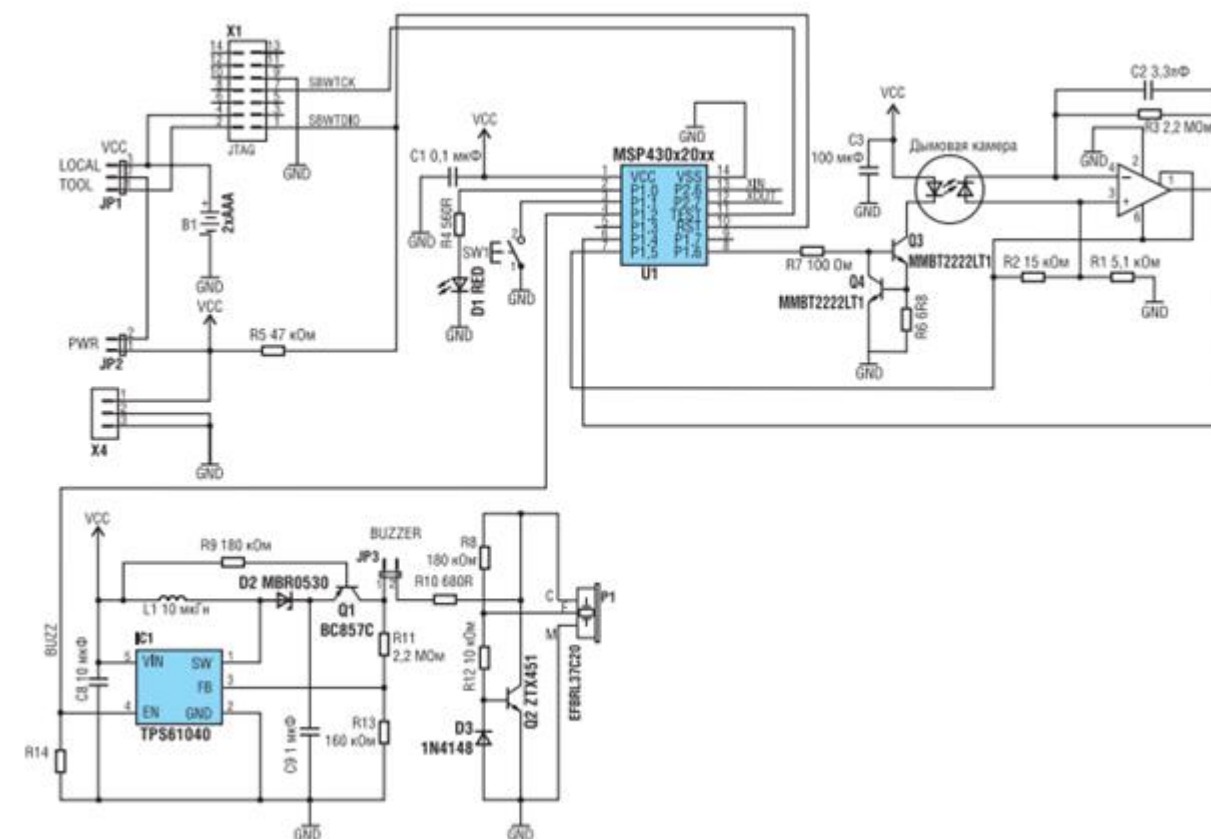


Рис. 2.2. Принципова електрична схема датчика

Для сигналізації про спрацьовування датчика диму передбачені звуковий випромінювач (ЗВ) P1 (EFBRL37C20, Panasonic) та світлодіод D1. ЗВ відноситься до п'єзоелектричному типу. Він доповнений компонентами типової схеми включення (R8, R10, R12, D3, Q2), які забезпечують безперервну генерацію звуку при подачі постійної напруги.

Застосований тут тип ЗВ генерує звук частотою  $3,9 \pm 0,5$  кГц. Для живлення схеми ЗВ вибрано напруга 18 В, при якому він створює звуковий тиск близько 95 дБ (на відстані 10 см) та споживає струм близько 16 мА. Дану напругу генерує підвищувальний перетворювач напруги, зібраний на базі мікросхеми IC1 (TPS61040, TI). Необхідна вихідна напруга задана зазначеними на схемі номіналами резисторів R11 і R13. Схема перетворювача також доповнена каскадом ізоляції всього навантаження від батарейного живлення (R9, Q1) після переведення TPS61040 в черговий режим (низький рівень на вході EN). Це дозволяє виключити протікання струмів витоку в навантаження та, таким чином, звести загальне споживання даними каскадом (при відключеному ЗВ) до рівня власного статичного споживання мікросхеми IC1 (0,1 мкА). У схемі також передбачені: кнопка SW1 для ручного включення / відключення ЗВ; «джампери» для конфігурації ланцюга живлення схеми датчика (JP1, JP2) та підготовки до роботи ЗВ (JP3), а також роз'єми зовнішнього живлення на етапі налагодження (X4) та підключення адаптера вбудованої в МК системи налаштування (X1) через двохрановідний інтерфейс Spy - Bi-Wire.

### **2.3 Функціональний опис приладу**

Далі розглянемо особливості алгоритму роботи датчика, який повністю реалізується програмної МК та проілюстрований у вигляді блок-схеми на рис.2.3.

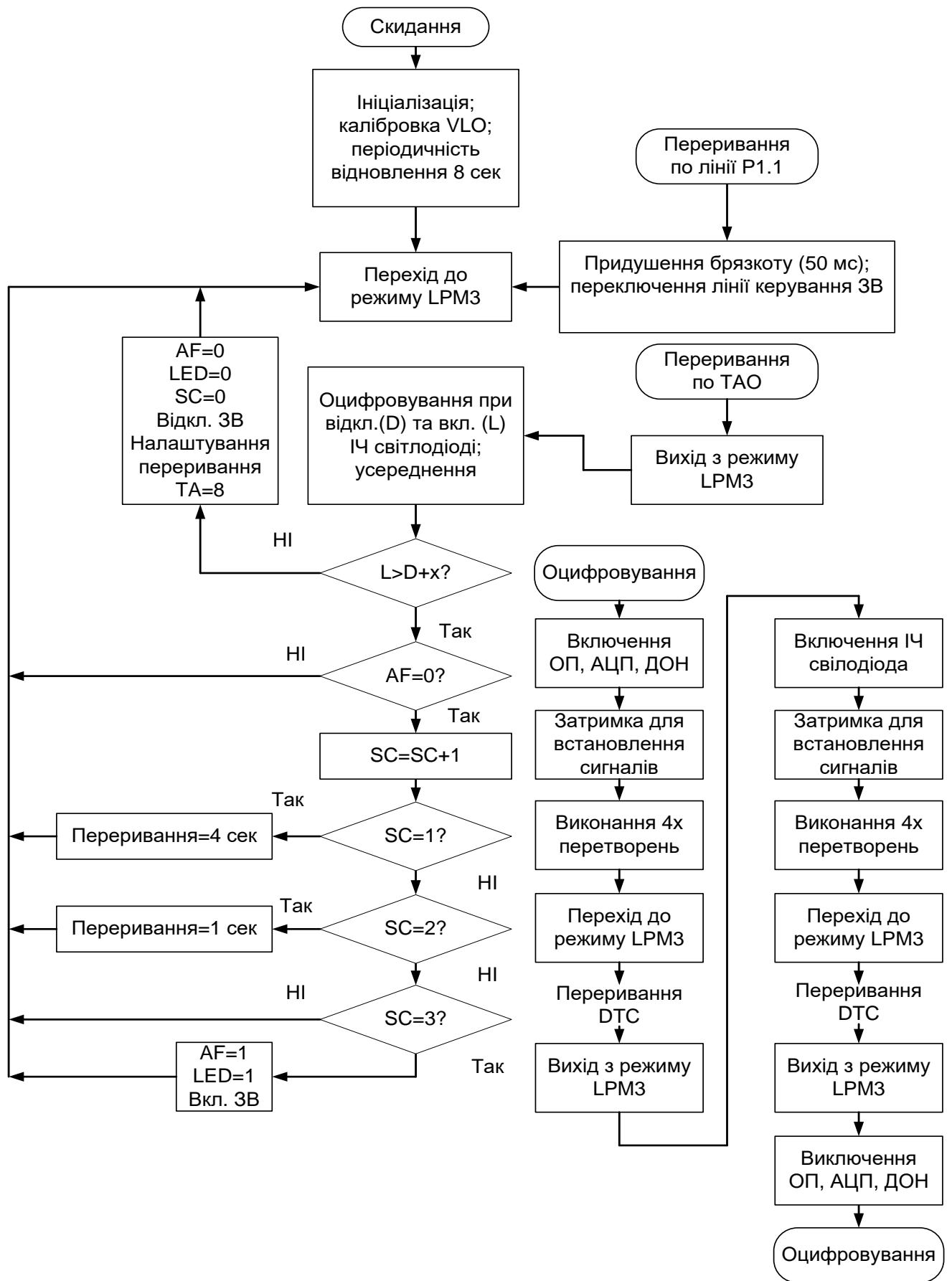


Рис. 2.3. Блок-схема програми МК

Після скидання МК виконується вся необхідна ініціалізація, в т.ч. калібрування генератора VLO та налаштування періодичності відновлення активної роботи МК, рівної восьми секундам. Слідом за цим МК переводиться в економічний режим роботи LPM3. У цьому режимі залишається в роботі VLO та таймер А, а ЦПУ, високочастотна синхронізація та інші модулі вводу-виводу припиняють роботу. Вихід з цього стану можливий за двома умовам: генерація переривання по входу P1.1, яке виникає при натисканні на кнопку SW1, а також генерація переривання таймера А, яке відбувається після закінчення встановлених восьми секунд. У процедурі обробки переривання по входу P1.1 спочатку генерується пасивна затримка (приблизно 50 мс) для придушення брязкоту, а потім змінюється на протилежний стан лінії керування ЗВ, даючи можливість вручну керувати активністю ЗВ.

Коли ж виникає переривання за таймером А (переривання ТА0), виконується процедура оцифровування виходу підсилювача фотоструму в наступній послідовності. Спочатку виконуються чотири оцифровування при відключеному ІЧ світлодіоді, потім - чотири оцифровування при включеному світлодіоді. Надалі ці оцифровування піддаються усередненню.

У кінцевому рахунку формуються дві змінні: L - середнє значення при відключеному ІЧ світлодіоді, та D – середнє значення при включеному ІЧ світлодіоді. Чотирикратне оцифровування та їх усереднення виконуються з метою виключення можливості помилкових спрацьовувань датчика. З цією ж метою вибудовується подальший ланцюг «завад» помилкового спрацьовування датчика, починаючи з блоку співставлення змінних L і D. Тут сформульовано необхідна умова спрацьовування:  $L-D > x$ , де x - поріг спрацьовування. Величину x вибирають дослідним шляхом з міркувань нечутливості (наприклад, до пилу) та гарантованого спрацьовування при попаданні диму. Якщо умова не виконується, відбувається відключення світлодіода і ЗВ, скидається прапор стану датчика (AF) та лічильник SC. Після цього, виконується налаштування таймера А на відновлення активної роботи через вісім секунд, та МК переходить до режиму LPM3. Якщо умова виконується,



перевіряється стан датчика. Якщо він уже спрацював ( $AF=«1»$ ), то ніяких подальших дій виконувати не потрібно, і МК відразу переводиться в режим LPM3. Якщо ж датчик ще не спрацював ( $AF=«0»$ ), то виконується інкрементування лічильника SC з метою підрахунку числа виявлених виконань умов спрацювання, що в ще більшому ступені дозволяє підвищити завадостійкість. Позитивне рішення про спрацювання датчика приймається після виявлення трьох поспіль умов спрацювання. Проте, щоб уникнути надмірного затягування затримки реагування на появу диму, тривалість знаходження в черговому режимі скорочується до чотирьох секунд після першого виконання умов спрацювання і до однієї секунди - після другого.

На закінчення визначимо середній споживаний датчиком струм. Для цього в табл. 2.1 занесені дані по кожному споживачу: споживаний струм (I) і тривалість його споживання (t).

Таблиця 2.1

**Середній споживаний струм з урахуванням 8-секундної затримки в роботі датчика**

Споживач струму	Тривалість, мкс	Споживаний струм, мкА	Середній споживаний струм, мкА
MSP430 в активному режимі (1 МГц, 3 В)	422,6	300	0,016
MSP430 в режимі LPM3	$8 \times 10^6$	0,6	0,6
Операційний підсилювач	190,6	650	0,015
ДОН АЦП	190,6	250	0,006
Ядро АЦП	20,8	600	0,0016
ІЧ світлодіод	100,8	105	1,26
TPS61040 в режимі відключення	неперервно	0,1	0,1
		Всього	2

Для циклічно-працюючих споживачів, з урахуванням 8-секундної затримки, середній споживаний струм (мкА) дорівнює  $I \times t / 8 \times 10^6$ . Підсумовуючи знайдені значення, знаходимо середній споживаний датчиком

струм: 2 мкА. Це дуже хороший результат. Наприклад, при використанні батарейок ємністю 220 мА × рік розрахункова тривалість роботи (без урахування саморозряду) складе близько 12 років.

Область застосування систем локалізації вибухів не обмежується тільки гірничими виробками вугільних шахт, вони можуть застосовуватися також і для локалізації вибухів в інших підземних спорудах та приміщеннях (у тунелях, рудниках, на газоперекачувальних станціях, в системах вентиляції, в метрополітені, на деревопереробних, борошномельних, лакофарбових та інших підприємствах, газо-, нафто- і спиртосховищах, тощо).

Для запису програми на мікроконтролер використовується USB-програмактор. Перед цим у середовищі IAR Embedded Workbench IDE здійснюється компіляція програмного коду. Останній складається з чотирьох структурних блоків. Перший блок контролює встановлення початкових даних, таких як скидання та встановлення таймера, прапорців. Другий - відповідає за подачу / прийом сигналів на порти, запуск таймера. Третій - відповідає за умови та циклічність роботи мікроконтролера. Четвертий - відповідає за роботу з LED-світлодіодом. Напочатку програма сприймає освітленість LED-світлодіода - як "середню". Далі вводяться дві змінні: перша відповідає "темному" освітленню світлодіода, друга - "яскравому". На всіх наступних етапах програма спирається на отримані значення про освітленість LED-світлодіода.

Оскільки вихідний сигнал з фотоприймача низький, то необхідно окремо розглянути питання температурної стабільності робочих характеристик.

## РОЗДІЛ 3

### АНАЛІЗ ТЕМПЕРАТУРНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СВІТЛОДІОДІВ ТА ФОТОПРИЙМАЧІВ

#### 3.1 Температурні залежності світлодіодів

Світлодіоди беруть участь у формуванні відповідальних сигналів і при розрахунках необхідно враховувати температурні залежності, а також розробляти методи компенсації доглядів параметрів. Під впливом температури практично всі фундаментальні характеристики світлодіодів змінюються, та вказуються в специфікаціях виробником тільки при кімнатних температурах і становлять основу для проектування схем. Знання характеру зміни характеристик залежно від теплових умов дозволить врахувати і скоригувати вихідні дані даних пристроїв.

При створенні датчика полум'я досліджувалися електричні та електролюмінесценційні характеристики зовнішнього і контрольного світлодіода для проектування схем контролю запиленості вхідного вікна датчика та інфрачервоного фотоприймача. Характеристики знімалися при різних щільності струму і робочих температурах.

Причини впливу температури на параметри випромінювання світлодіодів в кілька нерівних пропорціях поділяються на дві частини, зовнішні та внутрішні фактори зміни умов функціонування випромінювання кристала. Робота світлодіода пов'язана з протіканням електричного струму через р-п перехід кристала і рекомбінацією носіїв зарядів. Неодноразово згадуване в публікаціях значення ККД світлодіода, яким би воно не було, не може забезпечити роботу гетероструктури без виділення тепла. У середньостатистичному світлодіоді переважна більшість спожитої енергії йде саме на нагрів (ККД становить 12 -16%). Тому завжди, хоч би якою була температура навколишнього середовища, існує вплив власного нагріву кристала, кристалотримача та інших частин конструкції на весь комплекс параметрів світлодіода. Воно безперервно накладається на зовнішні фактори зміни температури і прямо пропорційно залежить від динаміки споживання

електричної потужності світлодіодом. У підсумку виходить дуже складна температурна характеристика працюючого світлодіода, що враховує і поєднує всі перелічені фактори. Зважаючи на складність обліку всіх компонентів цієї характеристики простіше зіставити підсумки експериментів з визначення параметрів з фізичними основами роботи напівпровідникового випромінювача, результатом чого можуть стати залежності параметрів цілком реальних світлодіодів від температури.

Не заглиблюючись у тонкощі процесів, що відбуваються в області просторового заряду випромінюючої гетероструктури, що складається з твердих розчинів матеріалів групи  $A_{III}B_V$ , можна сказати, що основним елементом сформованого p-n переходу є заборонена зона, де відбувається рекомбінація носіїв зарядів. Представляючи із себе енергетичний бар'єр для зарядів, який вони повинні подолати для того, щоб рекомбінувати з носієм протилежного знаку, заборонена зона з її характеристиками визначає параметри цієї рекомбінації, таким чином формуючи характеристики результатів актів рекомбінації - оптичного і теплового випромінювань. Тому температурні залежності ширини забороненої зони будуть вносити пригнічуючий за значимістю внесок у зміни спектрального складу, енергетичних та інших параметрів виробленого структурою випромінювання та електричних (пряме напруга) характеристик світлодіода.

Зміна ширини забороненої зони при зміні температури пов'язано з двома ефектами термічним розширенням кристалічної решітки кристала і рекомбінацією за участю кванта теплового випромінювання - фонона. Вплив термічного розширення решітки забезпечує приблизно 25% спостережуваної температурної залежності. Теоретичний розрахунок внеску, що дається цим ефектом, показує, що ширина забороненої зони при високих температурах змінюється лінійно з температурою. У більшості напівпровідників значення  $E$  зменшується з ростом температури.

Великий внесок у квантову (енергетичну) ефективність випромінювання буде вносити і носить конкуруючий характер, безвипромінювальна рекомбінація, що також залежить від температури.

Квантова ефективність визначається як відношення числа рухливих носіїв, що дають внесок у випромінювання, до повного числа носіїв, що беруть участь в рекомбінації.

Іншими словами, внутрішній квантовий вихід випромінювання - число випромінюваних фотонів на одну електронно-дірковий пару. У гетероструктурах ця величина теоретично може бути близька до 100%. Для практики, однак важливіший зовнішній квантовий вихід випромінювання - відношення числа випромінюваних в зовнішнє середовище квантів світла до числа електронно-доручених пар, які перетинають р-n перехід. Він характеризує перетворення електричної енергії в світлову і, крім внутрішнього квантового виходу, враховує коефіцієнт інжекції пар в активну область і коефіцієнт виведення світла у зовнішнє середовище.

Дані залежності виведені для ідеалізованих структур. Безумовно, на практиці вплив зовнішніх факторів набагато більше і носить більш виражений характер через наявність дефектів, що неминуче виникають при епітаксії (вирощуванні кристалів) у вигляді нерівномірності розподілу легуючих домішок і при монтажі кристалів (контактні явища). Як правило, подібні ефекти накладаються один на одного і лише посилюють результат зміни температури.

Настільки великий вплив температури на переважне число характеристик світлодіодів, які взаємопов'язані, варто розділити на групи за природою виникнення і результату впливу - приблизно так, як формуються специфікації на світлодіоди.

Першою групою параметрів є електричні: залежно прямої напруги від температури при постійному струмі. Ці параметри будуть залежати в основному від характеру зміни ширини забороненої зони р-n переходу. Тут і далі доцільно розглядати діапазон температур навколишнього середовища,

всередині якого зберігається працездатність світлодіода і вірні наведені значення величин.

Як правило цей діапазон не буває менше - 60 і більше 60 °С. Подібні температури характерні і для робочого діапазону, встановленого для різних вузлів електронної апаратури, що виконують функцію управління режимом світлодіода.

Підставляючи пряму напругу світлодіода як функцію від температури, необхідно мати один фіксований параметр, щодо якого змінюється напруга, тому тут мова піде про деяке сімействі залежностей при різних прямих токах. Відмінність в поведінці кривих цього сімейства буде складатися в основному в різних ступенях теплового впливу цього струму і різного ступеня охолоджуючої здатності кристалотримача (конструкції світлодіода), яка нелінійна по відношенню до змін температури і струму. Однак на низьких температурах це позначається мало: більш впливовим фактором виявляється зовнішня низька температура, а перегрів кристала щодо її стає менш помітним. Це можна пояснити значним збільшенням зовнішнього квантового виходу при цих температурах, що призводить до зменшення виділення тепла при рекомбінації. У теж час, на високих температурах збільшення температури призводить до ланцюгової реакції: знижується, зменшення не призводить до пропорційного зменшення, охолоджуюча здатність кристалотримача (конструкції світлодіода) значно знижується через малу різниці зовнішньої і внутрішньої температур, вичерпуючи в межі ліміт теплоємності, в результаті з подальшим зростанням температури градієнт напруги зменшується, прагнучи до мінімуму і будучи наслідком врівноваженості динаміки внутрішнього і зовнішнього нагрівання.

Зважаючи істотної різниці в багатьох показниках у кристалів з різними розмірами заборонених зон, матеріалами, складу структури і положки для кожної групи світлодіодів будуть не тільки свої залежності, а й функції інших величин.

Вольт амперні характеристики вимірювалися при знаходженні зразків в термостаті, вміщеному в термокамеру, всередині якої була досягнута задана температура навколишнього середовища.

Завдання достовірної оцінки параметрів фотоприймачів для побудови на їх основі датчиків полум'я для систем локалізації вибухів значно ускладнюється через необхідність враховувати виникає в процесі напрацювання деградацію параметрів. Розробники відповідальних пристроїв на фотоприймачах вже не можуть задовольнитися загальноприйнятою цифрою, яку зазначає виробник, кажучи, що напрацювання становить не менше 1000000 годин з втратою до 30% чутливості і яка не підтверджується жодними розрахунками.

Абсолютно очевидно, що на практиці ніхто не перевіряв, наскільки достовірна ця величина - хоча б тому, що на це знадобиться не менше 11 років (до того ж, ступінь деградації більшості параметрів істотно залежить від багатьох факторів при реалізації всього технологічного ланцюжка виробництва, а також умов та режиму експлуатації). Оцінка зміни параметрів за допомогою прискореної деградації при напрацюванні у форсованому режимі не є коректною через включення в таких режимах інших фізичних механізмів роботи напівпровідникової структури, які не впливають на поведінку характеристик в штатних умовах використання.

Не менш важливими також є електричні характеристики світловипромінюючих діодів. Це прямі і зворотні вольт-амперні характеристики, залежно прямої напруги  $U$  і прямого струму  $I_f$  від температури навколишнього середовища, люмен-амперні характеристики (залежності інтенсивності випромінювання від прямого струму через світлодіод). За цими параметрами можна визначити необхідні характеристики джерел живлення проектного пристрою розрахувати режими кінцевих пристроїв комутації, навантаженням яких будуть використовуватися світлодіоди. Слід зазначити, що всі описані вище характеристики світловипромінюючих діодів знаходяться в безпосередній залежності один від одного, тому, як

правило, лише їх сукупність дозволяє правильно судити про тих чи інших параметрах світлодіода. Однак найбільш точно визначити відповідність заявленим виробником параметрів світлодіода, його якість і довговічність можна лиш проводячи комплекс вимірювань і розрахунків його характеристик.

### 3.2 Лабораторне вивчення температурних залежностей світлодіода

Зовнішній вигляд установки для проведення досліджень показаний на рис.3.1.

Інтенсивний розвиток технологій в області оптоелектронних приладів на основі напівпровідникових випромінюючих кристалів дозволило використовувати ці прилади для отримання контрольних джерел випромінювання у вимірювальній техніці.

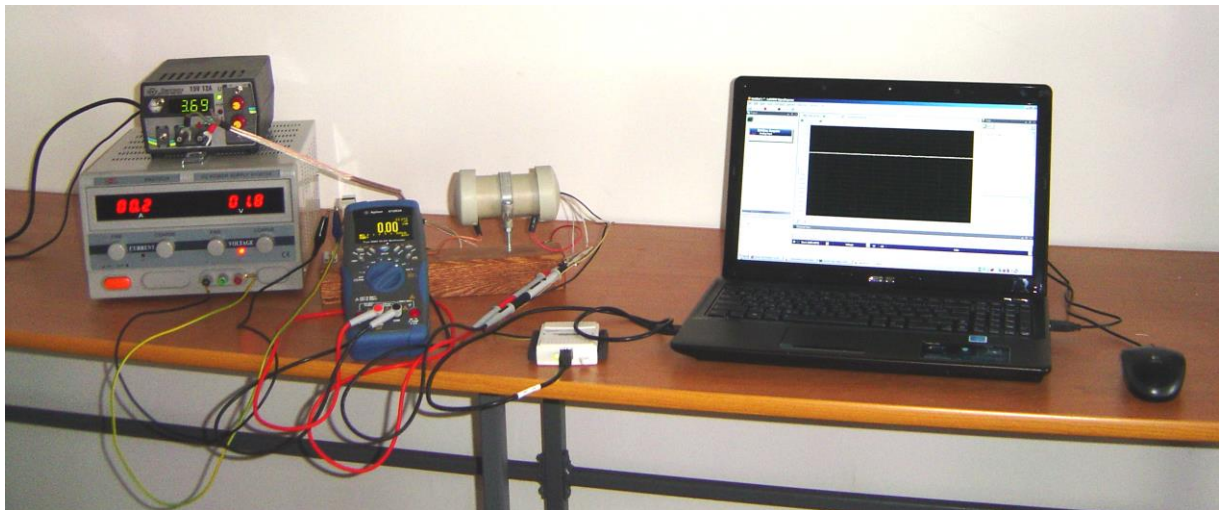


Рис. 3.1. Зовнішній вигляд експериментальної установки для вивчення температурних залежностей світлодіодів.

Розташований усередині термостата світлодіод підключений до джерела живлення з можливістю плавно змінювати струм у діапазоні 0 - 50мА. Фіксованим параметром, щодо якого строяться всі залежності, є струм через кристал. Вольт-амперна характеристика виміряна з кроком зміни струму при кожній температурі 1мА (50 значень для 50мА).



Порядок вимірювань був наступним. Температура всередині камери підвищувалася до верхньої досліджуваного межі ( $+50^{\circ}\text{C}$ ) і підтримувалися такою протягом пів години для усунення перехідних процесів. На світлодіод подавалася напруга живлення зі струмом першого дискрета вимірювання статичних характеристик - 1мА. Після закінчення 30 с (час стабілізації параметрів) відбувався вимір випромінювання з максимальним часом накопичення кілька секунд (для забезпечення найбільшої точності показань).

Далі процес повторювався, з наступним значенням струму. У діапазоні 0-50мА дискрети були обрані через 1 мА. Після вимірювання останніх значень (на струмі 50 мА) У камері починала встановлюватися наступна температура і програма повторювалася.

Таким чином, світлодіод мав не менше 50 значень всіх параметрів на кожній температурі в діапазоні від  $-10$  до  $+50^{\circ}\text{C}$  з кроком  $30^{\circ}\text{C}$ .

Градiєнт напруги досить сильно залежить від температури і має стійку тенденцію до зростання при зниженні температури. Ці обставини слід враховувати тоді, коли йдеться про розрахунки електричних режимів роботи світлодіодів в якому або пристрої, який буде працювати при різних температурах навколишнього середовища.

Варто також звернути увагу ще й на режими кінцевих каскадів і ключів, навантаженням яких є світлодіоди при динамічному управлінні. Їх динамічний діапазон і рівень напруги живлення не повинні вплинути на випромінювальні параметри світлодіодів при зміні температури через порушення електричного режиму. І без цього характеристики оптичного випромінювання світлодіодів істотно зміняться з температурою.

На рис.3.2 представлені вольт амперні характеристики зовнішнього, а на рис.3.3 контрольного світлодіодів. Так виглядає сімейство кривих при різних температурах. Тут видно, що змінюється не тільки саме значення прямої напруги, але і його градієнт. Графіки зручні для використання при розрахунках режимів кінцевих каскадів - ключів, які керують роботою світлодіодів.

Енергетичні характеристики світлодіодів також істотно залежать від температури. Найпоширеніший і найбільш відомий серед користувачів параметр, хоча і досить опосередковано відображає енергетику випромінювання - осьова сила світла. Поведінка при зміні температури носить характер, ідентичний зміні інших важливих енергетичних параметрів світлового потоку і оптичної потужності, тому часто використанням цієї характеристики в найпростіших випадках і обмежуються. Яка не залежить ні від одного з решти параметрів випромінювання, осьова сила світла дає лише відносну характеристику на відміну від інтегрального світлового потоку, який залежить не тільки від зміни інтенсивності випромінювання з температурою, але і від перерозподілу його щільності по поверхні кристала і, як наслідок, від зміни виду діаграми спрямованості випромінювання світлодіода. Оптична потужність  $P$  має ще більш складну залежність через одночасне урахування зміни потоку і спектрального складу випромінювання, який також дуже сильно змінюється з температурою.

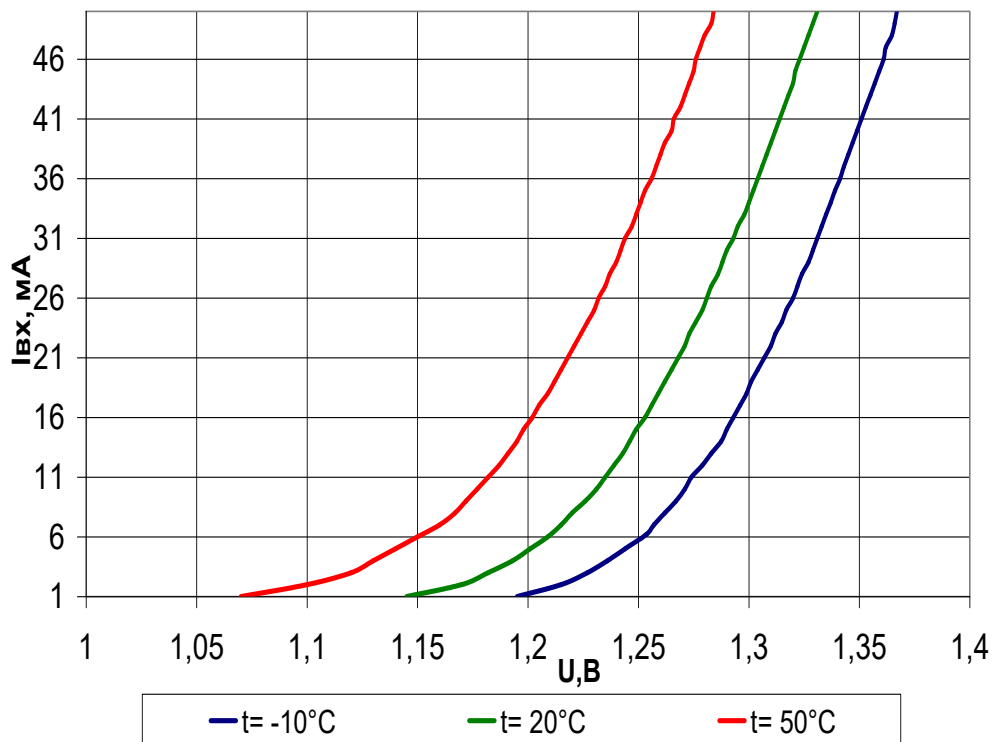


Рис.3.2.Характеристика зовнішнього світлодіода

Для розробки схеми компенсації температури зняті залежності вихідного струму інфрачервоного каналу ФМ611 від струму через контрольний світлодіод і фотодіода від струму через зовнішній світлодіод.

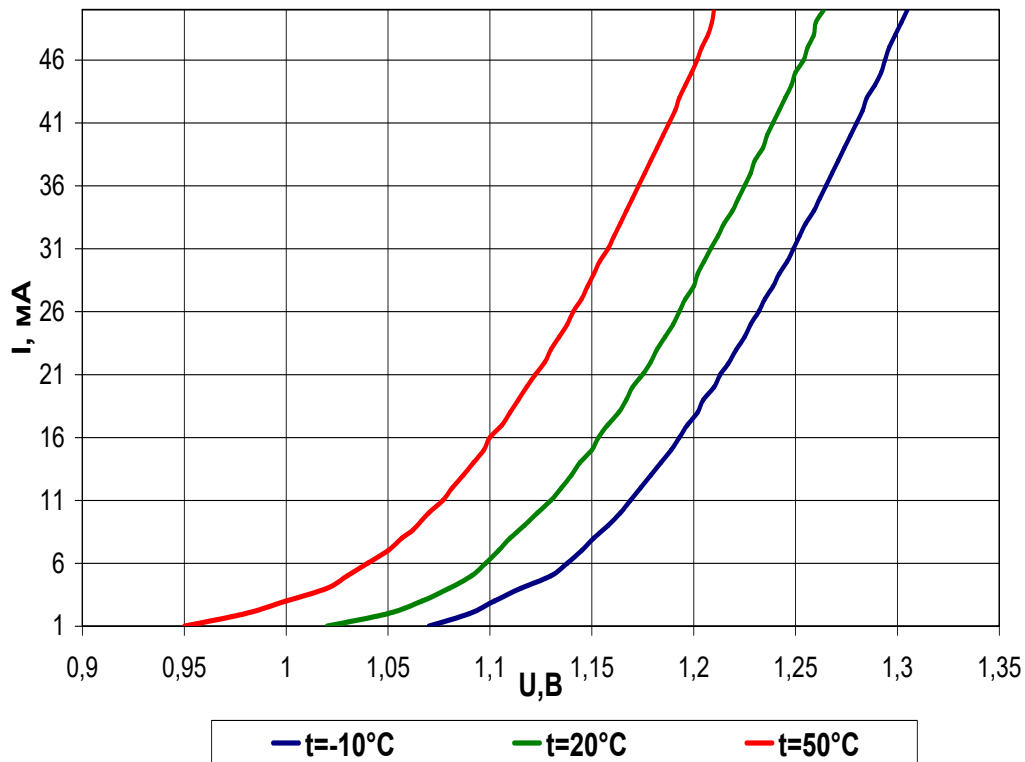


Рис.3.3.Характеристика контрольного світлодіода [10]

Найбільший вплив на догляд параметрів світлодіода при зміні температури буде надавати процес, що протікає в області просторового заряду.

Однак існує також твердження про те, що випромінюючу структуру варто розглядати не як єдину область з флуктуацією ширини забороненої зони, а як схему, де виконано паралельне включення безлічі мікроскопічних р-п переходів зі своїми, відмінними один від одного значеннями  $E_1, E_2, \dots, E_n$ . Набір таких р-п переходів і формує всі спектральний розподіл кристала, вносячи свій внесок у вигляді окремої довжини хвилі (моди) і відповідної амплітуди випромінювання. Подібна модель випромінюючої структури добре пояснює зміну параметрів спектра з температурою, коли зміни ширини забороненої зони кожного елемента призводять до пропорційної зміни інтенсивності випромінювання на

своїй довжині хвилі. Точно таке ж пояснення можна застосувати і для зміни прикладеного зовнішнього електричного поля (прямого напруги), яке до речі, буде змінюватися обов'язково, відповідно до залежностями, показаними на рис.3.1 та 3.2. При підвищенні будуть включатися малі р-п переходи з найбільшими  $E$ , що збільшить внесок короткохвильових складових у спектр. При цьому зростання амплітуди довгохвильових компонентів, уже включених в роботу малими на експоненційному ділянці вольт-амперної характеристики буде значно менше через явища насичення і обмеженого їх кількості. При певному перший процес буде домінувати над другим. Цим пояснюється характерна не симетрія спектрального розподілу випромінювання, що визначається положенням центральної довжини хвилі спектра при малих щільності струму, вирівнюються при їх збільшенні або при зміні температури.

У першому наближенні кількісний склад переходів з різними значеннями  $E$  буде визначатися гаусівським розподілом щодо середніх значень  $E$  для даної структури, що й можна помітити при розгляді виду форми кривих спектрального розподілу як результату складання двох функцій: згаданої вище і функції розподілу щільності заповнення Фермі-Дірака. Таким же чином склад спектру випромінювання дозволяє судити про рівномірність розподілу легуючої домішки в шарах напівпровідникового матеріалу і наявності сторонніх включень, що, по суті, і визначає якість випромінює кристала і довговічність світлодіода.

Графіки справедливі для густин струму через кристал  $20 - 50 \text{ А / см}^2$  (прямий струм через світлодіод зі стандартним кристалом  $300 \times 300 \text{ мкм}$  становить  $15-40 \text{ мА}$ ). Залежності при інших щільності струму будуть відрізняти від наведених через відповідної зміни теплового дії струму. При зміні температури змінюється і зміщується спектр випромінювання.

Найбільш часто в специфікаціях зустрічається напівширина спектру випромінювання за рівнем  $0.5$  від максимуму амплітуди. Ця величина виходить як різниця значень довжин хвиль правого і лівого спадів спектральної характеристики випромінювання, відповідних вказаною вище рівнем

амплітуди. Напівширина функції дозволяє судити про склад спектру випромінювання та ступеня монохроматичності як якісного показника випромінювання світлодіода.

Вивчення всього комплексу температурних залежностей параметрів світлодіодів не може не наштовхнути на пошук способів компенсації доглядів цих параметрів. Існує два основні шляхи побудови системи обліку та і пом'якшення наслідків температурних змін. Перший - безпосередньо впливає на фізичні умови роботи світлодіодів. Це може бути термостабілізація навколишнього середовища, застосування охолодження і навпаки підігрів при негативних температурах. Однак точно реалізувати підтримку температури у відповідності з наведеними залежностями світлодіодів цими засобами досить важко, хоча, якщо не вимагається виконання занадто жорстких умов, то найбільш легко реалізовується.

Другий спосіб стосується в основному програмно керованих джерел. Тут температурні уходи дуже ефективно відслідковуються із застосуванням математичного апарату керуючого програмного забезпечення, коли в залежності від температури в зоні роботи світлодіодів, реєстрованої термодатчиком.

Дослідження впливу температури на приймач інфрачервоного випромінювання вироблялося на тій же установці (рис.3.4). Графіки вихідного струму фотоприймача при різних температурах зображені на рис.3.4.

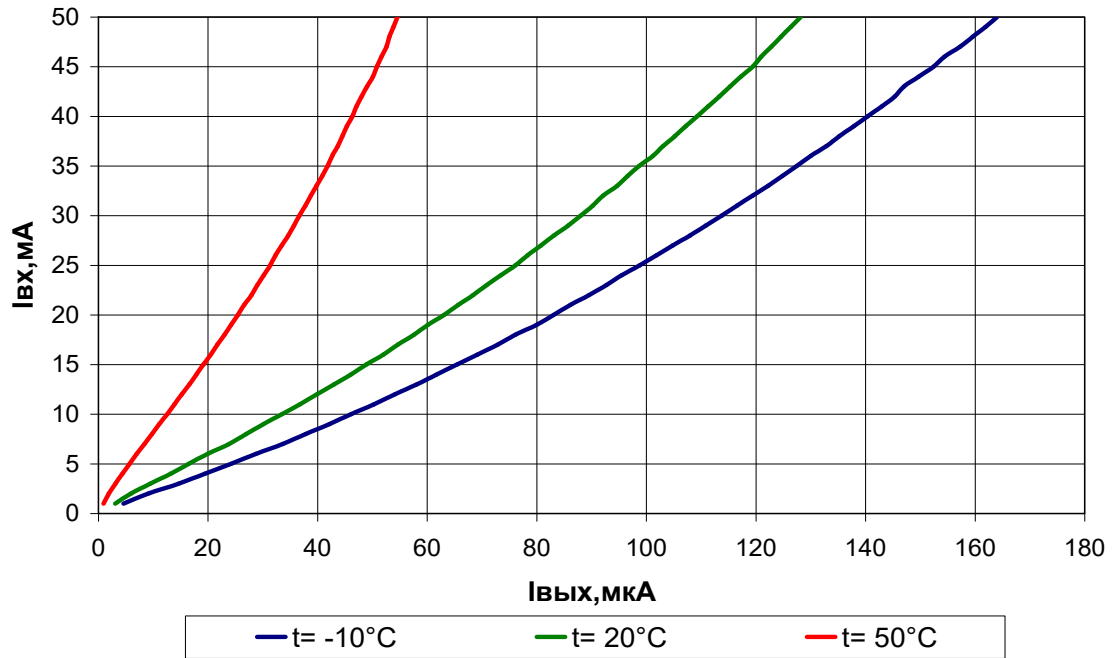


Рис.3.4.Графіки вихідного струму фотоприймача [10]

Ступінь впливу температури на вихідний сигнал ФМ611 залежить від схеми включення фотоприймача. На рис.3.5 наведена залежність напруги вихідного сигналу від температури при великому опорі навантаження. На рис.3.6 приведена залежність вихідного струму від температури при нульовому опорі навантаження.

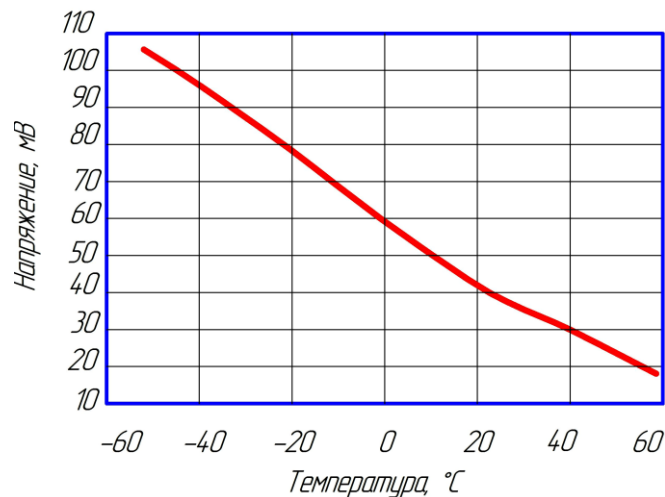


Рис.3.5.Залежність напруги холостого ходу ІЧ-фотоприймача від температури [10]

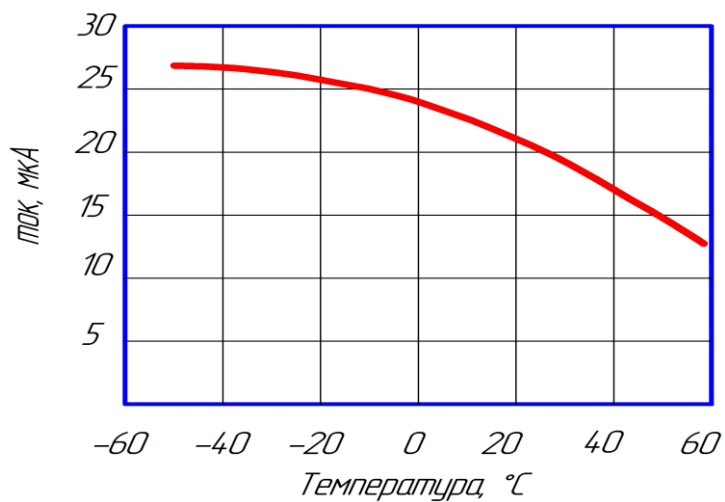


Рис.3.6. Залежність струму короткого замикання ІЧ-фотоприймача від температури [10]

З метою зменшення впливу температури на параметри фотоприймача, в датчику полум'я використовується включення фотоприймача в режимі короткого замикання.

## ВИСНОВКИ

Як переваги запропонованого мікропроцесорного модуля керування комплексом гасіння вибухів слід відзначити дуже мале споживання енергії пристроєм. Середнє споживання датчиком обмежується силою струму 2 мкА. Це забезпечується повторно-короткочасним режимом його роботи, при якому тривалість паузи в багато разів перевищує тривалість активної роботи. У такому випадку середнє споживання буде зводитися до сумарного статичного споживання енергії неактивними компонентами схеми. Мікроконтролер після переведення в черговий режим споживає струм 0,6 мкА. У цю величину також входить споживаний струм вбудованого RC-генератора та таймера. Останній дозволяє продовжувати відлік часу навіть після переведення мікроконтролера в черговий режим роботи. Проте, слід відмітити низьку стабільність генератора (номінальна частота 12 кГц в залежності від навколишньої температури може змінюватися в дуже широких межах  $\pm 100\%$ ), що обумовлює необхідність вирішення питання щодо його калібрування. Останнє досягається шляхом використання більш високочастотного генератора.

Оскільки вихідний сигнал з фотоприймача низький, то окремо розглядається питання температурної стабільності його робочих характеристик. Існує два основні шляхи побудови системи обліку та і пом'якшення наслідків температурних змін. Перший - безпосередньо впливає на фізичні умови роботи світлодіодів. Це може бути термостабілізація навколишнього середовища, застосування охолодження і навпаки підігрів при негативних температурах. Другий спосіб стосується в основному програмно-керованих джерел. Тут температурні уходи дуже ефективно відслідковуються із застосуванням математичного апарату керуючого програмного забезпечення, коли в залежності від температури в зоні роботи світлодіодів, реєстрованої термодатчиком.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Нецепляев М.И. Борьба со взрывами угольной пыли в шахтах / Нецепляев М.И., Любимова А.И., Петрухин П.М. и др. - М.: Недра, 1992.- 299с.
2. Mayne J. Les arrêts-barrages declenches dans. Les charbonnages de la communaulte / [Mayne J.] // Europeenne Annales des Mines de Belgigue. - №3. - 1988. – P.189-263.
3. Плоскоголовый Е.П. Методика на проведение исследований макета ВПУ для определения временных параметров процесса создания взрывоподавляющей среды и НИИ по оценки уровня безопасности его с экспериментальными образцами пиротехнических зарядов : Отчет МакНИИ по безопасности работ в горной промышленности / Плоскоголовый Е.П., Кашуба О.И., Ковтун Ю.С. и др. - Макеевка, 1993. – 9с.
4. Нецепляев М.И. Автоматическая система взрывозащиты шахт СЛВА / [Нецепляев М.И., Мягкий Б.И., Плоскоголовый Е.П.] / 24 Международная конференция безопасности работ в горной промышленности. МакНИИ, Макеевка, 1991.
5. Новиков, Ю. В. . Основы микропроцессорной техники / Ю.В. Новиков, П.К. Скоробогатов . - М.: ИНТУИТ, 2007. - 422 с.
6. Мягкий Б.М. Технический отчет 0184.0049634/ Мягкий Б.М., Нецепляев М.И - Макеевка: МакНИИ, 1986.-177с.
7. Мягкий Б.И. Технический отчет 0185.0045698 / Мягкий Б.И., Нецепляев М.И. - МакНИИ, Макеевка, 1988 – 120с.
8. Вершинин О.Е. Применение микропроцессоров для автоматизации технологических процессов. — Л.: Энергоатомиздат, 1986
9. Лепихов А. И. Система взрывозащиты / А. И. Лепихов / – 2010. – 7с.
10. Староверов К. Датчик дыма на микроконтроллере MSP430F2012 / [ Староверов К. ] // Новости электроники. – № 2. - 2010. - С. 16 -18.
11. Клингман Э. Проектирование микропроцессорных систем. Пер. с англ.

- М.: Мир, 1990

12. Гилмор Ч. Введение в микропроцессорную технику/ Пер. с англ.-М.: Энергоатомидат, 1984

13. Лепіхов О. Дослідження спектральних характеристик датчика полум'я / [Лепіхов О., Котлубаєв М., Бурик І.] // Електроніка та інформаційні технології. – 2012. – Вип. 2. – С. 88 – 95.

14. MSP430x2xx Family User's Guide (literature number SLAU144)

15. Семейство микроконтроллеров MSP430x2xx. Архитектура, программирование, разработка приложений / пер. с англ. Евстифеева А. В. — М. : Додэка-XXI, 2010. — 544 с.: ил. — (Серия «Мировая электроника»). — ISBN 978-5-94120-221-8

16. LV278x, TLV278xA Семейство быстродействующих Rail-to-Rail операционных усилителей с функцией отключения

17. А.Е.Умнов и др. «Предупреждение и локализация взрывов в подземных условиях», изд. Недра, 1990.

18. TPS6104x Low-Power DC-DC Boost Converter in SOT-23 and WSON Packages datasheet

19. Правила безопасности в угольных шахтах. Книга 3. Инструкции по борьбе с пылью и пылевзрывозащите. —Липецк: Липецкое издательство, 1999. — 109 с. ПБ 08-622-03

20. Шагурин, И.И. Современные микроконтроллеры и микропроцессоры / И.И. Шагурин. - М.: Горячая линия -Телеком, 2004. - 952 с.

21. Мясников А.А., Старков С.П., Чикунов В.И. Предупреждение взрывов газа и пыли в угольных шахтах.- М.:Недра, 1985.- 205 с