



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ

Факултет по Електронна Техника и Технологии

Катедра „Електронна Техника“

Маг. инж. Иван Павлов Топалов

**МЕТОДИ И СРЕДСТВА ЗА СЪЗДАВАНЕ НА
ИНТЕЛИГЕНТНИ ИЗМЕРВАТЕЛНИ СИСТЕМИ ЗА
СЛЕДЕНЕ НА ПАРАМЕТРИ И СЪБИРАНЕ НА
ИНФОРМАЦИЯ ЗА ОКОЛНАТА СРЕДА**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация за придобиване на образователна и научна степен
"ДОКТОР"

Област: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.2. Електротехника, електроника и автоматика

Научна специалност: Електронизация

**Научен ръководител: доц. д-р инж. Марин Маринов
доц. д-р инж. Георги Николов**

СОФИЯ, 2019 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „Електронна Техника“ към Факултет по Електронна Техника и Технологии на ТУ-София на редовно заседание, проведено а 20.05.2019 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 19.09.2019 г. от 13:00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ-52-66 / 31.05.2019 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. проф. дтн инж. Иво Илиев – председател
2. доц. д-р инж. Марин Маринов – научен секретар
3. проф. дтн инж. Тихомир Таков
4. проф. дтн инж. Петко Витанов
5. доц. д-р инж. Нина Джерманова

Рецензенти:

1. проф. дтн инж. Иво Илиев
2. доц. д-р инж. Нина Джерманова

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Факултет Електронна Техника и Технологии на ТУ-София, блок №1, кабинет № 1355.

Дисертантът е задочен докторант към катедра „Електронна Техника“ на Факултет по Електронна Техника и Технологии. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора, като някои от тях са подкрепени от научноизследователски проекти.

Автор: маг. инж. Иван Топалов

Заглавие: Методи и средства за създаване на интелигентни измервателни системи за следене на параметри и събиране на информация за околната среда

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

През 21-ви век опазването на околната среда се превърна в съществен проблем както в развитите, така и в развиващите се страни. Нарастването на населението и напредъкът на технологиите създават нови предизвикателства, освен това използването на природни ресурси непрекъснато се увеличава. Налице са множество доказателства, които показват, че подобно развитие е довело до значителни вредни въздействия върху околната среда. Известно е, че дейностите на хората често причиняват неочаквани промени на почвата, водата, въздуха, климата и природните ресурси. Това на свой ред води до все по-нарастващ интерес към опазването на околната среда и фокусира вниманието на обществото към все по-обхватното ѝ наблюдаване и характеризиране чрез оценка на редица физични, химични и биологични фактори, които ѝ влияят. Тази информация е необходима за изследователите, за лицата, отговорни за вземането на решения и за обществото като цяло - за осъществяване на социални промени, необходими за запазване и поддържане на здравословна среда за бъдещите поколения [1].

Мониторингът на околната среда обхваща нейното наблюдение и изследване. Чрез обективни наблюдения се получават надеждни данни, които от своя страна дават ценна информация. От научна гледна точка това се постига чрез събиране и обработване на данни (т.нар. Learning analytics), след което се извлича необходимата информация. По този начин основаният на научен подход мониторинг на околната среда обхваща първите три стъпала на т.нар. стълбица на познанието [2]. От нея се извличат знания (Information-derived knowledge), които водят до по-добро разбиране на проблемите, а това подпомага вземането на информирани решения. Важно е обаче да се подчертае, че и други фактори, включително политически, икономически и социални, влияят значително върху вземането на решения.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Въз основа на направения обзор и изведените заключения могат да се формулират целта и задачите на дисертационния труд.

Целта на дисертационния труд е анализ, проектиране, реализация и изследване на сензорни мрежови архитектури за мониторинг на параметри на околната среда.

За постигане на поставената цел са формулирани следните задачи:

- На базата на проучване на съвременните достижения в областта на дългосрочното следене на параметри на околната среда и по-специално на качеството на въздуха, да се формулират изисквания към фиксирани сензорни мрежи и към мобилни мрежови устройства за мониторинг на качеството на въздуха, както и на перспективни направления за тяхното развитие.
- Да се анализират методи и средства за повишаване на точността на нискобюджетни сензори за оценка на качествата на въздуха, с възможност за вграждане в многоточкови широкообхватни мрежови архитектури.
- Да се проектират, разработят и изследват експериментално наземни системи за мониторинг на въздух на открито и в закрити помещения и да се сравни точността им с референтни източници.
- Да се проектират, разработят и изследват експериментално надземни системи за мониторинг на въздух на открито, чрез използване на безпилотни летателни апарати (дронове).

Научна новост

Резултатите от дисертационния труд показват, че на базата на нискобюджетни и полупрофесионални сензори успешно могат да се изграждат измервателни устройства за мониторинг на основните замърсители на въздуха.

Точността и прецизността между устройствата значително могат да се подобряват чрез филтриране и калибриране на необработените сензорни данни.

Практическа приложимост

Разработените системи в глава 1 могат да бъдат използвани за индустриална сградна автоматизация и контрол с цел намаляване на разходите за отопление и вентилация.

Описаните системи в глава 3 могат да бъдат използвани за контрол и мониторинг на концентрациите на ФПЧ, чиито висок нива могат да доведат до негативни ефекти върху човешкото здраве, флората и фауната.

Модулите разработени в глава 4 са подходящи за следене на замърсяването на въздуха в градски среди и индустриални зони с цел предупреждение на населението при евентуални опасни нива.

Част от разработките могат да бъдат използвани в лабораторни упражнения по Електронни Системи за Екологичен Мониторинг.

Предложените методи и подходи биха били полезни за проектантите и инженери работещи в областта на системите за управление на сградни инсталации.

Апробация

Апробацията на резултатите се базира на сравняване на получените измервания с тези от официалните станции на Изпълнителна Агенция за Околната среда, като техните резултати са изтеглени от официалната страница на Европейската Агенция за Околната Среда (European Environment Agency).

Публикации

Основни постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в осем, научни статии, от които една самостоятелна. Седем от тях са публикувани на английски език и една на български. Една е в годишно периодично издание, останалите са представени на конференции. Две публикации са представени на международни конференции и една от публикациите е реферирана в SCOPUS седем пъти от международни публикации.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от **180** страници, като включва увод, **4** глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо **177** литературни източници, като **138** са на латиница и **4** на кирилица, а останалите са интернет адреси. Работата включва общо **69** фигури и **10** таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА 1. СЕНЗОРИ И ТЕХНОЛОГИИ ЗА МОНИТОРИНГ НА КАЧЕСТВОТО НА ВЪЗДУХА

1.1 Качество на въздуха - определения и стандарти

Земната атмосфера е съставена основно от газовете азот (N_2) – 78 %, кислород (O_2) – 21 % и аргон (Ar) – 1 %. Техния баланс се контролира от биосферата чрез издигане и отделяне на материали от земната кора и газове от вътрешността на планетата Земя. Във въздуха има и водни пари, съставляващи от 0,1 до 4 % от тропосферата. Останалите газови съставки (примеси) представляват по-малко от 1 % от атмосферата. Тези газови съставки са известни и като „трасиращи газове“, и към тях се отнасят въглеродния диоксид и метана. Газовите примеси играят решаваща роля за земното радиоактивно равновесие и за химическите свойства на атмосферата. Освен газовете, атмосферата, без значение в градски или отдалечени райони, съдържа значително количество прахови частици или аерозол. Под прахови частици се разбира каквато и да е субстанция, с изключение на чиста вода, която съществува в течно или твърдо състояние в атмосферата при нормални условия и е от микроскопичен или субмикроскопичен размер [4].

Състоянието „Замърсяване на въздуха“ може да бъде дефинирано като ситуация, при която субстанции, причинени от човешка дейност, са налични в концентрации значително над техните нормални за околната среда нива и могат да причинят измерим негативен ефект на хора, животни, растения и материали [3].

Замърсяването на въздуха е най-голямата причина за преждевременна смърт на хората, предизвикана от човешката дейност. По данни на Световната здравна организация (WHO) от 2014 г., повече от 400 000 са починали в периода от 2010 до 2014 г., вследствие на замърсяването на въздуха в Европа. Сърдечните заболявания и инфарктите, предизвикани от замърсен въздух, са най-често срещаните причини за смърт (около 80 % от случаите). След тях са заболяванията на белите дробове и рак на белия дроб, водещи също до голям брой жертви. Около 90 % от населението на Европа живеещо в големи градове са изложени на замърсители с концентрация във въздуха, която се смята вредна за здравето. Например, изчислено е, че ФПЧ могат да намалят продължителността на живота с повече от осем месеца [5].

1.1.1 Основни замърсители – термини и определения

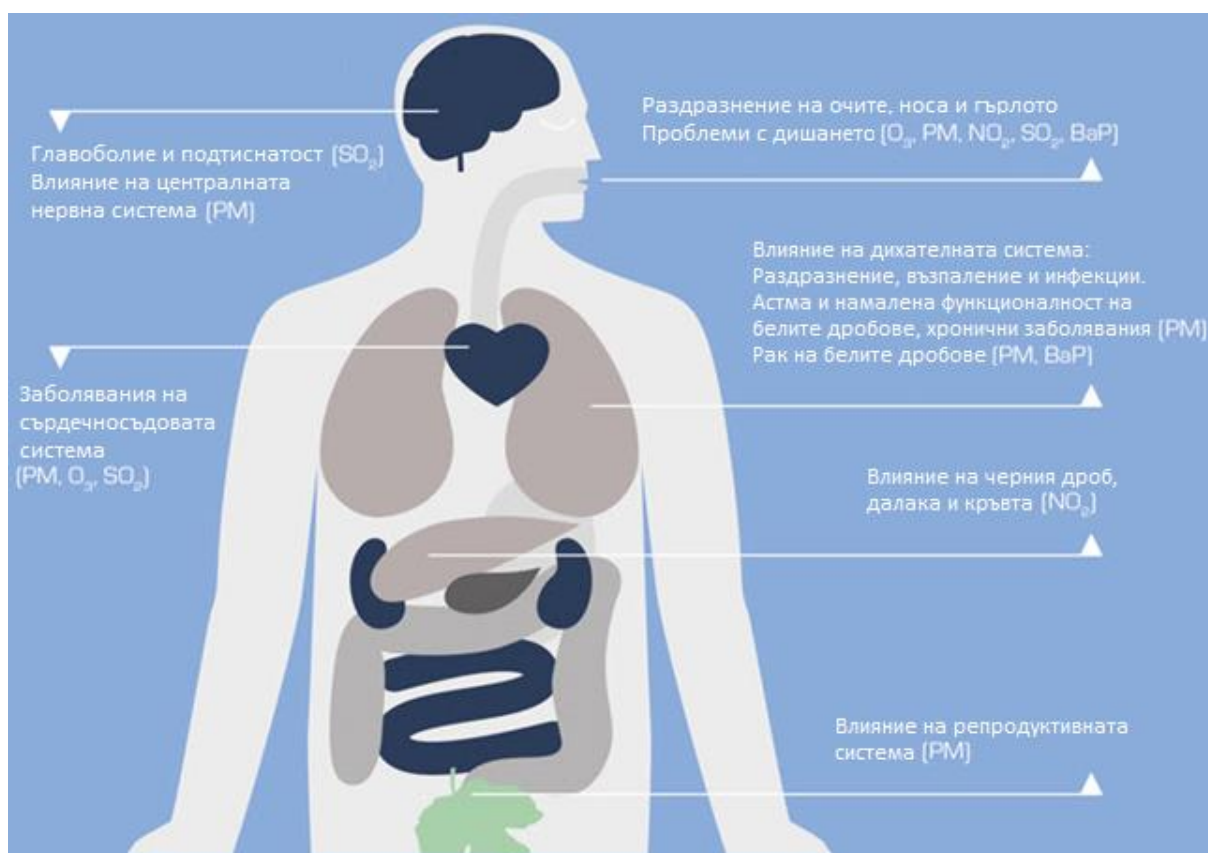
Замърсителят може да бъде от естествен произход или създаден от човека. Замърсители се класифицират като първични и вторични. Първичните замърсители обикновено са продукт на процеси като изригването на вулкан. Други примери включват газ въглероден моноксид (CO) излизащ от ауспусите на моторните превозни средства или серен диоксид (SO_2), изпускан от производствени предприятия.

Вторичните замърсители не се изпускат директно. Те по-скоро се формират във въздуха, когато първичните замърсители реагират или си взаимодействат с околната среда, или с други налични замърсители и субстанции. Озонът (O_3) около Земята е типичен пример за вторичен замърсител. Някои от замърсители могат да бъдат и първични, и вторични – те са образувани директно и също така са продукт от реакции на първични замърсители [4].

Субстанциите, отделени в атмосферата вследствие на човешката дейност, включват въглероден диоксид (CO_2), въглероден оксид (CO), серни оксиди (SO_x), преди всичко серен диоксид (SO_2), азотни оксиди (NO_x), преди всичко азотен диоксид (NO_2), органични

замърсители, фини прахови частици (PM_x), постоянни свободни радикали, хлоро-флуоро-въглероди (CFC), амоняк (NH_3), миризми, радиоактивни замърсители и други.

На Фиг. 1.1 е показано схематично влиянието на различните замърсители върху различните органи на човешкото тяло [4].



Фиг. 1.1 Проблеми, причинени от различните замърсители на въздуха

1.1.2 Директиви на Европейския Съюз (ЕС)

Европейският парламент и Съветът на европейския съюз, на 21 май 2008 година приема Директива относно качеството на атмосферния въздух и за по-чист въздух в Европа [15].

Основна цел на директивата е да се намали замърсяването до нива, които да сведат до минимум вредното му въздействие върху човешкото здраве, като обръща специално внимание на урбанизирания райони и на околната среда като цяло. Цели се също подобряване на качеството на данните при измерването и оценката на качеството на въздуха и предоставяне на повече достоверна информация на обществеността.

1.1.3 Индекси за оценка на качеството на въздуха

Индексите за оценка на качеството на въздуха (Air Quality Index AQI) са важен инструмент за известяване на риска и влиянието, което околният въздух може да има върху човешкото тяло. Те дават информация на хората за локалните нива на замърсяване и потенциалните заплахи за здравето, които могат да последват. При високи нива на замърсяване рискът е най-голям при уязвимите групи, като деца, по-възрастни и хора със заболявания на сърдечносъдовата и дихателната система. Хората използват индекса за качество на въздуха, за да преценят дали дадена дейност е подходяща да бъде изпълнена на определен ден. Например, училища и спортни организации могат да проверят нивото на AQI и да решат кога да планират спортни или други мероприятия.

1.1.3.3 Изчисляване на индекси за качество на въздуха

Най-популярният метод за осъществяване на това е базиран на система от САЩ. Методът се използва в редица страни и мрежи за мониторинг на качеството на въздуха и затова тук той е разгледан наред с Европейския индекс за качеството на въздуха.

Концентрацията на замърсители се изчислява по скала от 0 до 500, като индексна стойност от 100 отговаря на границата поставена от националния стандарт за качеството на въздуха, за всеки от замърсителите.

Таблица 1.1 Скала на AQI – стандарт на САЩ

Индекс на качеството на въздуха (AQI)	Степен на опасност	Цветовете
Когато AQI е в тези граници:	... условията на въздуха са:	... обозначени от съответния цвят:
0 до 50	Добри	Зелен
51 до 100	Умерени	Жълт
101 до 150	Нездравословни за чувствителни групи	Оранжев
151 до 200	Нездравословни	Червен
201 до 300	Много нездравословни	Лилав
301 до 500	Опасни	Кестеняв

За да се преведе дадена стойност от концентрация към AQI се използва следната формула:

$$I = \frac{I_{high} - I_{low}}{C_{high} - C_{low}} (C - C_{low}) + I_{low} \quad (1.1)$$

където:

I = индекс за качеството на въздуха (AQI)

C = концентрацията на замърсителя

C_{low} = най-близката гранична точка която е $\leq C$

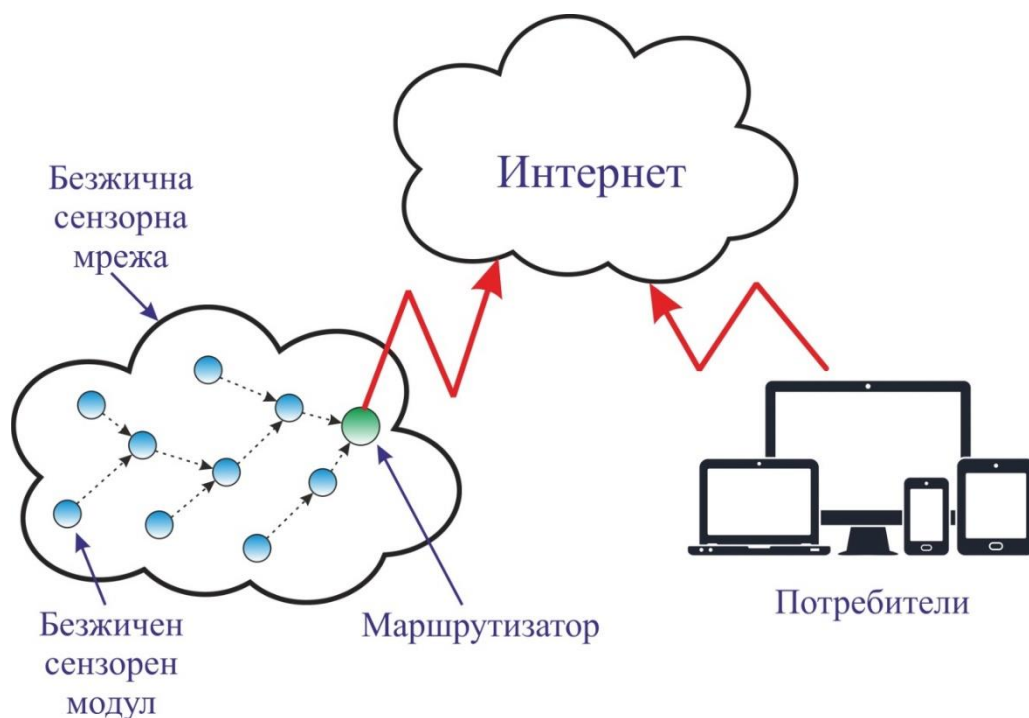
C_{high} = най-близката гранична точка която е $\geq C$

I_{low} = индексната стойност отговаряща на C_{low}

I_{high} = индексната стойност отговаряща на C_{high}

1.2 Проучване и анализ на интелигентни сензорни системи и сензорни мрежи

Структура на типична безжична сензорна мрежа (Wireless Sensor Network – WSN) е показана на Фиг. 1.5 и се състои от един маршрутизатор и многобройни сензорни устройства или модули разположени на различни места за следене на физически или параметри на средата, като температура, влажност, налягане и т.н. Потребителите могат да получат отдалечен достъп до данните от сензорните модули на безжична сензорна мрежа през маршрутизатор. Достъпът може да бъде осъществен както безжично така и през кабел. Безжичните сензорни мрежи започват да стават доста популярни в следенето на параметрите на околната среда, параметрите на машини и други приложения.



Фиг. 1.5 Структура на безжична сензорна мрежа

1.2.3 Дефиниция – нискобюджетни сензори (*Low cost sensors*)

Понятието „Ниско бюджетни сензори“ се отнася за първоначалния разход по закупуването на функционална сензорна система сравнен с разхода по закупуване на референтен инструмент измерващ същия или подобен замърсител на въздуха или параметри на парниковите газове. Обикновено разликата в пари между ниско бюджетните сензори и референтни сензори е два пъти а дори и няколко пъти.

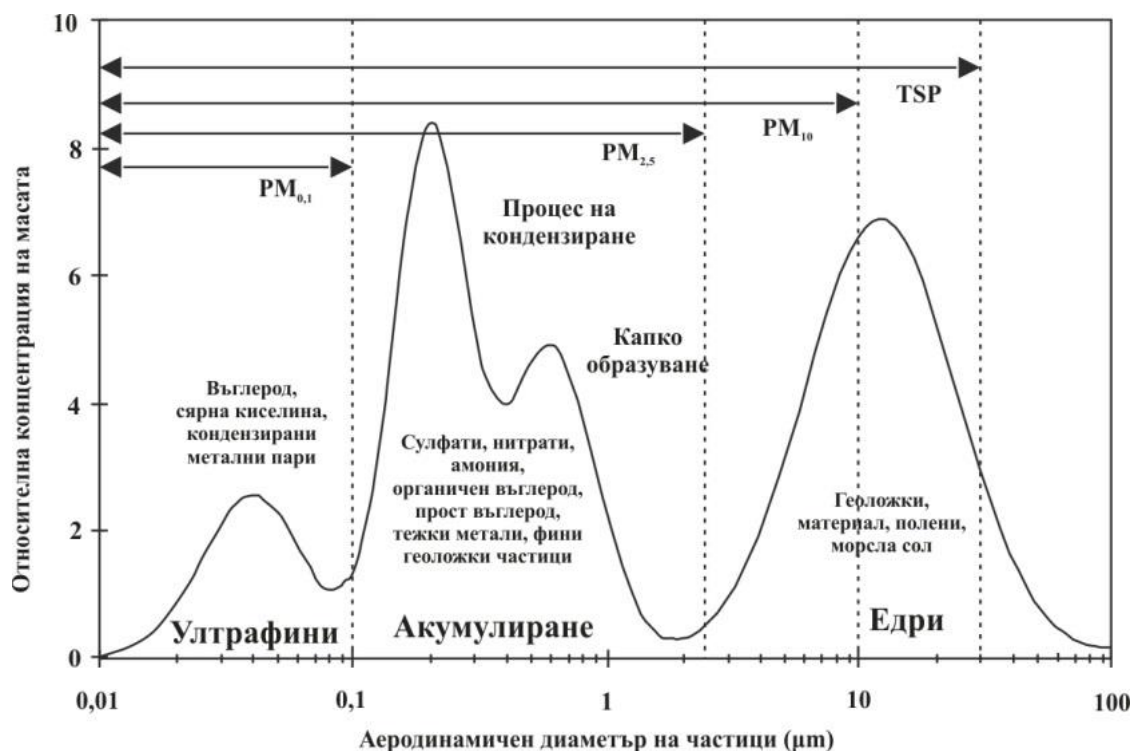
1.3 Методи и технологии за мониторинг на качеството на въздуха

1.3.1 Нови подходи в мониторинга на околната среда

Съвременните иновации в сензорните технологии водят до разработването на миниатюрни сензори, които могат да се използват като самостоятелни устройства, да се свързват към смартфони или дори да бъдат вграждани в смартфони [39]. При условие, че такива сензори могат да бъдат произведени достатъчно евтино, те притежават потенциала да дадат възможност за изграждане на нови видове интелигентни мрежи, които позволяват наблюдение и мониторинг на параметрите на околната среда като при това да се постигне значително по-високи нива на пространствено-времева детайлност.

1.3.4 Мониторинг на концентрациите на ФПЧ

Стандартните показатели, които всъщност се използват в регулирането, се основават на масовата концентрация (в $\mu\text{g}/\text{m}^3$) на всички частици с аеродинамичен диаметър, по-малък от $10\ \mu\text{m}$ (PM_{10}) или $2,5\ \mu\text{m}$ ($PM_{2,5}$) (Фиг. 1.7). Напоследък броят на частиците (Particle Number Count - PNC, в брой на cm^3) се използва за количествено определяне на най-малките частици (УПЧ), тъй като те трудно допринасят за общата маса, но могат да имат важни здравни ефекти.



Фиг. 1.7 Относителна концентрация на масата в зависимост от аеродинамичния диаметър на частиците

1.3.4.1 Основни методи за измерване на концентрацията на ФПЧ

Съществува голямо разнообразие от подходи, техники и инструментариум. Най-често обаче методите за определяне на масова концентрация биват филтър-базирани гравиметрични уреди, оптични анализатори, анализатори с β -абсорбция и устройства с микровезна [48]. Обобщение на основните методи и уреди за измерване на концентрация на ФПЧ са дадени на Фиг. 1.9.



Фиг. 1.8 Методи и уреди за измерване на концентрация на ФПЧ

1.3.5 Мониторинг на концентрации на газове

1.3.5.1 Приложение на нискобюджетни сензори за мониторинг

Сегашното поколение нискобюджетни металооксидни или електрохимични газови сензори предлагани в търговската мрежа не може да се използва лесно и непосредствено за прецизен мониторинг на качеството на атмосферния въздух. Когато се използват тези сензори за измерване на качеството на външния въздух, основните проблеми са ниската чувствителност (особено за замърсител, при който е важно измерването на концентрации в ppb обхвата), значителна чувствителност към промените в температурата и влажността, ниската селективност, недостатъчна дълговременна стабилност и дрейф на изходния сигнал. Важна част от сложността и свързаните с това високи разходи за мониторинг на качество на въздуха е свързана непосредствено с факта, че тези уреди трябва да бъдат чувствителни и високо селективни към изследваните замърсители независими от условията на околната среда и влиянието на атмосферните ефекти.

1.4 Калибриране

При калибрирането показанието на изследвания измервателен уред се сравнява с "вярна" референтна стойност. Калибрирането включва документиране на грешката при измерването (точността на измерването), изчисляване на неопределеността на измерването и създаване на сертификат за калибриране. Калибрирането се извършва при добре дефинирани референтни условия, не се изисква техническа намеса в устройството.

Функцията за калибриране може да се изведе чрез математично моделиране или емпирично с използване на интерполация. Функцията за калибриране често се търси във вид на линейна функция:

$$y = ac + b \quad (1.10)$$

1.4.1 Източници на грешки

Източниците на грешки могат да бъдат условно разделени на две групи, вътрешни и външни източници на грешки, както е показано на Фиг. 1.11. Трябва да се подчертае, че тук не са включени източници на грешки, върху които не може да се влияе чрез методи за калибриране, като напр. бавно време на реакция или ефекти свързани с мобилност на сензорите [82] [83].

1.4.3 Сравнения на моделите за калибриране, изводи

Основният модел за калибриране, който е необходим за всички видове сензори, е просто калибриране на офсета и на коефициента на усилване, т.е. линейна трансформация на „суровите“ измервания на сензора в концентрация на замърсител. Популярните математически методи са линейна регресия и методи, използващи прости нелинейни модели.

Поради сериозността на проблема със зависимостта на сензорните характеристики от атмосферни параметри, разширяването на основния модел с корекция на влиянието на температурата, налягането и влажността става наложително, за да се подобри значително точността на измерване на нискобюджетните сензори. Корекцията може лесно да бъде извършена чрез едновременно измерване на параметрите на околната среда и включването им в методи с множество променливи, като например множествена линейна регресия.



Фиг. 1.11 Преглед на типичните източници на грешки на нискобюджетни сензори и съответните подходи за калибриране

1.5 Изводи

Изводите от направения обзор са както следва:

- Определени са основни параметри, които характеризират качеството на въздуха на открито и на закрито. ФПЧ с размери $2,5 \mu m$ и по-малки са идентифицирани като особено опасни замърсители, за които трябва да се търсят съвременни решения за измерване на концентрациите им.
- Проучени и анализирани са известни технологии за мониторинг на основните параметри на качеството на въздуха и по-специално оптични сензори за измерване на концентрации на ФПЧ и амперометрични сензори за измерване на концентрации на основни замърсители на въздуха.
- Анализирани са елементите и структурата на устройства за мониторинг на основните параметри на качеството на въздуха.
- Формулирани са изисквания към мобилните устройства за мониторинг на въздуха и са определени перспективни направления за тяхното развитие.

ГЛАВА 2. СИНТЕЗ И РЕАЛИЗАЦИЯ НА СЕНЗОРНИ МРЕЖИ БАЗИРАНИ НА 1-WIRE

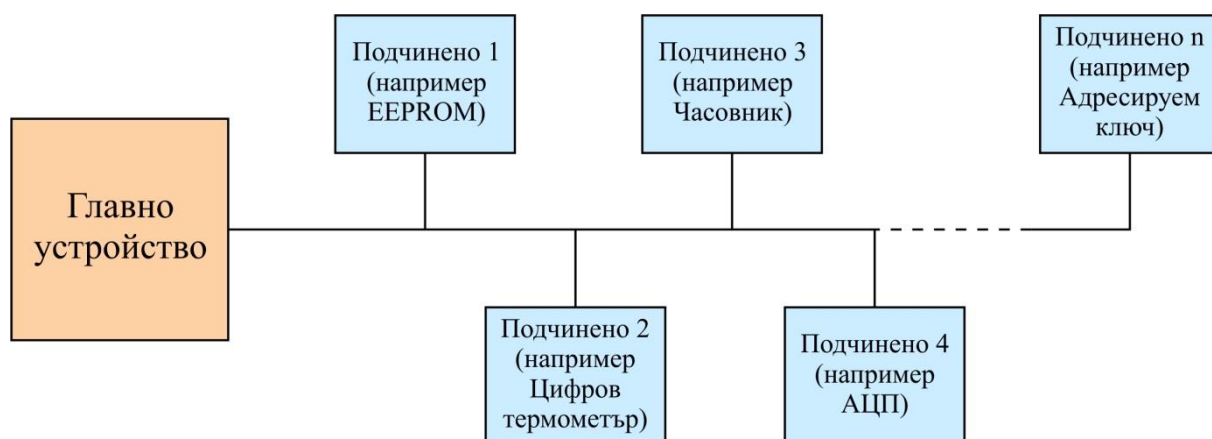
2.1 1-Wire

В основата на технологията 1-Wire е сериен протокол, използващ една единствена линия за предаване на данни и свързване към земя.

Протоколът използва проста схема за серийни комуникации между един главен и един или повече подчинени устройства - всички от които взаимодействат с шината, използвайки един ред за данни (Фиг. 2.1).

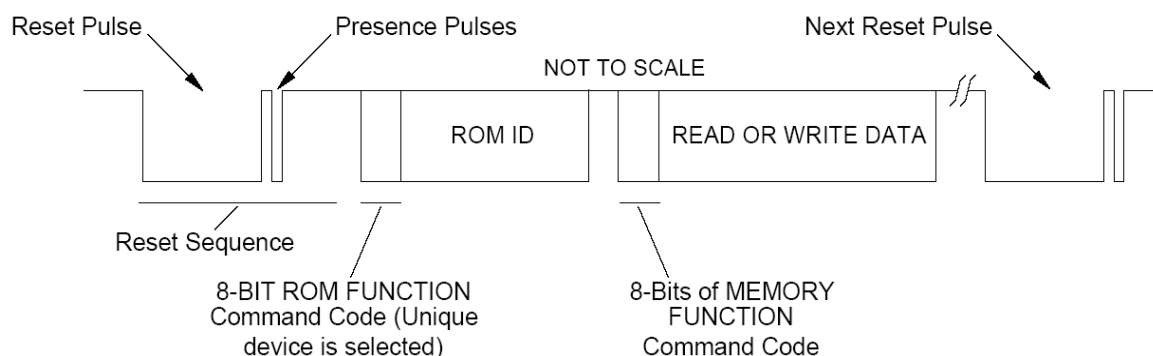
Управляващото устройство (1-Wire master) инициира и управлява комуникацията с едно или повече подчинени устройства свързани към 1-Wire шина. Всяко 1-Wire подчинено устройство (1-Wire slave) има уникален, непроменим, фабрично програмиран 64-битов

идентификатор (идентификационен номер), който служи като адрес на устройството свързано към 1-Wire шината.



Фиг. 2.1 Опростена схема на концепцията на технологията 1-Wire

За да се напише логическа единица към 1-Wire устройство, главното устройство издърпва шината към ниско ниво и го държи за 15 микросекунди или по-малко. За да напишете логическа нула, главното устройство издърпва шината към ниско ниво и го държи в продължение на поне 60 микросекунди, за да добави времеви запас за възможно най-лошия сценарий Фиг. 2.3.



Фиг. 2.3 Типична комуникационна последователност чрез 1-Wire интерфейс

2.2 Мрежа от температурни сензори, използваща 1-Wire интерфейс

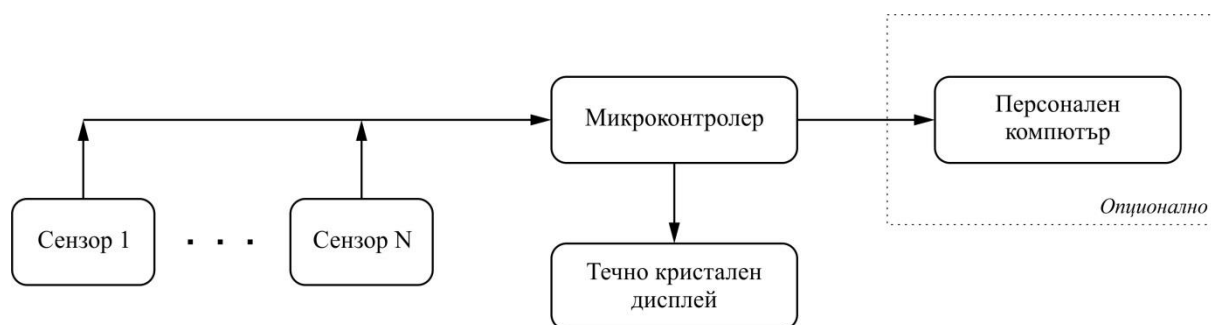
2.2.1 Проектиране

Характеристиките на системата включват възможност за свързване на голям брой сензори - теоретично броят им е неограничен, практически зависи от микроконтролера и неговите ресурси. Обхватът е 750 метра без използването на ретранслатори. Топологията е разпределена и в случай на неизправност на сензора, тя лесно може да се замени без да е необходимо изключване на захранването. За индикация се използва LCD. В случай на твърде голям брой сензори, свързани към системата, е по-добре да се използва персонален компютър като инструмент за визуализация. Системата предлага серийна връзка към персонален компютър.

2.2.2 Реализация на сензорната мрежа

Архитектурата на системата е показана на Фиг. 2.5. Главният контролер е Microchip PIC16F877, работещ на 20 MHz. Основни предимства на предлагания контролер са неговата

програмна памет, която е от тип FLASH. Това лесно програмиране и актуализация на фърмуера, когато е свързан към персонален компютър през серийния порт. Други функции на микроконтролера, които се използват, са таймерите (включително таймера за наблюдение), хардуерния сериен порт и някои от IO портовете.



Фиг. 2.5 Архитектура на сензорната система за измерване на температура

2.2.3 Изводи

Чрез използване на 1-Wire технологията могат да се реализират сензорни системи с ниска цена и консумация на енергия, подходящи както за преносими, така и за фиксирани разпределени измервателни приложения. Предлагащите компоненти, които използват тази технология улесняват процеса на проектиране и реализация на разнообразни сензорни системи.

2.3 Реализация на сензорна система за събиране на данни за околната среда използваща 1-Wire интерфейс

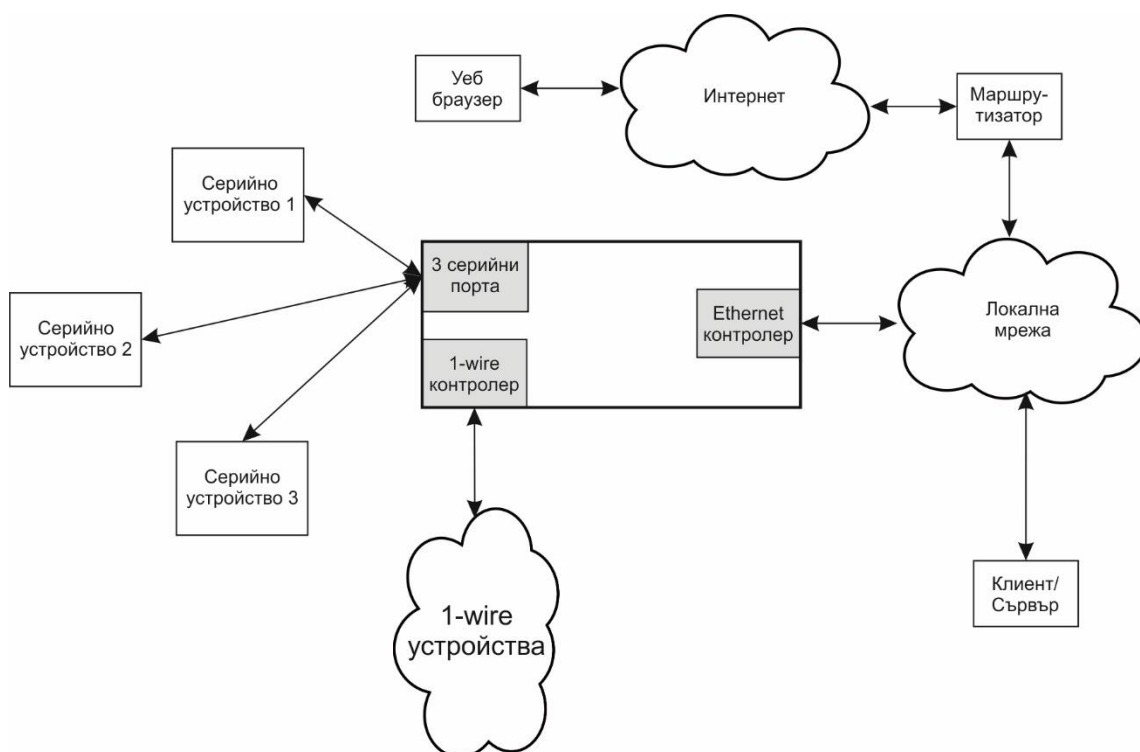
2.3.1 Сензорен модул

За практическата реализация е избран микроконтролер DS80C400. Периферните устройства на DS80C400 включват 10/100 Ethernet MAC, три серийни порта, CAN 2.0B контролер, 1-Wire Master и 64 входно/изходни порта. За да се осигури достъп до мрежата, пълният достъп до TCP IPv4/6 мрежовия стек и базова операционна система са съхранени в ROM паметта. Мрежовият стек поддържа до 32 едновременно TCP връзки и може да прехвърля до 5 Mbps през Ethernet MAC. Достъпът до паметта за данни и код е улеснен с 24-битова адресна шина, която поддържа до 16 MB памет. С наличието на сериозни мрежови и входно/изходни възможности, DS80C400 е предназначен да служи като контролер в многослойна мрежова среда. 10/100 Ethernet контролера за достъп (Media Access Controller - MAC) позволява на DS80C400 да осъществява достъп и да комуникира през интернет. Докато поддържа активни връзки към интернет, микроконтролерът може активно да контролира мрежите от по-ниско ниво с вградения специализиран хардуер. Структурата на системата за събиране на данни за околната среда е показана на Фиг. 2.6.

Мрежовото устройство за сензори свързва серийните устройства, сензорите и задвижващите устройства с Ethernet локална мрежа. В зависимост от реализацията и изискванията на конкретната задача мрежовото устройство може да предава данни директно или да ги обработва и да анализира.

Управлението на мрежовите сензорни устройства се извършва в среда на LabVIEW с помощта на интегрираната TCP/IP функционалност. Използва се проста архитектура клиент-сървър. Приложението, което работи на сървъра, позволява лесно конфигуриране на системата, започване на измервателни процедури, визуализация и съхранение на данните от измерването. Използването на програмната среда LabVIEW помага за значително

опростяване на потребителския интерфейс. Управлението на модулите може да се опрости до няколко бутона.

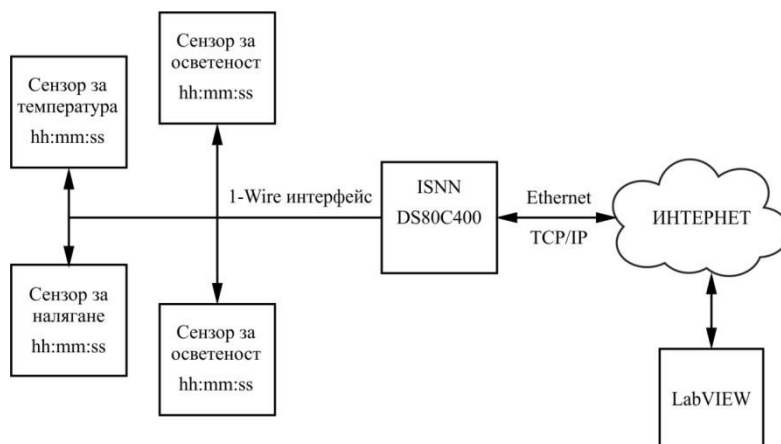


Фиг. 2.6 Структура на системата за събиране на данни за околната среда

2.3.2 Сензори за параметри на околната среда и 1-Wire интерфейс

За да се следят избраните параметри на околната среда, са избрани сензори с изходно напрежение. Тези сензори могат лесно да бъдат свързани към 1-Wire мрежа с помощта на мултифункционалната интегрална схема DS2438. Основните компоненти на DS2438 са 64-битов серийен номер записан в ROM паметта, температурен сензор, 10-битов АЦП, таймер за време и 40-байтова енерго-независима потребителска памет.

С помощта на вградения в DS2438 температурен датчик лесно се правят корекции на нелинейността в изходния сигнал, дължащи се на температурния дрейф. За точно измерване на температурата се използва сензор с интегриран 1-Wire интерфейс DS18B20. Структурата на разработената система е показана на Фиг. 2.8.



Фиг. 2.8 Структура на системата за събиране на данни за околната среда

2.3.3 Заключение

1-Wire технологията прави възможно комбинирането на електронна комуникация и сензорна апаратура. Лесната и надеждна идентификация на сензорните възли и способността за самостоятелно захранване дават значителни предимства за ефективното изграждане на разпределени сензорни мрежи.

Представеният подход за събиране на данни за околната среда в Интернет е успешно тестван в системи за мониторинг и управление на оранжерии.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТВАНЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ НА МОБИЛНИ СИСТЕМИ ЗА МОНИТОРИНГ НА ФИНИ ПРАХОВИ ЧАСТИЦИ

3.1 Мобилна система за онлайн мониторинг на ФПЧ

3.1.1.1 Проектиране на системата

Изисквания към системата

- Висока надеждност на устройството и осигуряване на възможност за дългосрочни измервания
- Възможност за измерване не само на PM_{10} , но също и на $PM_{2,5}$ и PM_1 по възможност
- Използване на нискобюджетни компоненти и интегриране в безжични сензорни мрежи с поддръжка на различни разпространени комуникационни стандарти (например ZigBee, 802.15.4, Wi-Fi, BLE, LoRa)
- Използване на различни интегрирани среди за тестване (MATLAB/LabVIEW) за намаляване на времето за реализация и модификация на приложения
- Достатъчна изчислителна мощност за обработка на данните от измерванията, мащабируема архитектура, която поддържа лесно разширение с периферни устройства, напр. звукови карти, микрофони, сензори за екологични и атмосферни параметри
- Възможност за дистанционен мониторинг на състоянието, GPS локализация и софтуерни актуализации
- Дългосрочна работа с автономно захранване.

3.1.2 Реализация на системата

3.1.2.1 Хардуер

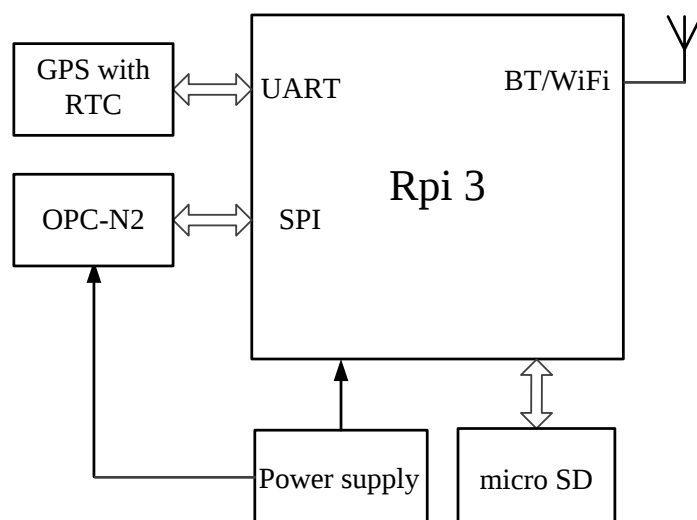
Така описаните изисквания са структурирани в блок-схема на системата, показана на Фиг. 3.1.

Благодарение на вградените в Raspberry Pi комуникационни модули са налице две възможности за свързване към интернет - в безжичен режим или чрез Ethernet кабел. Връзката през Ethernet обикновено е по-стабилна, но изисква достъп до кабелна мрежа. Тестовите на системата показват, че Wi-Fi връзката е добър избор, когато силата на сигнала е добър.

Сензор

Сензорът OPC-N2 класифицира частиците по размер, със скорост до 10 000 частици в секунда, и записва резултатите за размера на частиците в един от 16-те "контейнера",

покриващи размери в диапазона от 0,38 μm до 17 μm . Тези данни се използват за изчисляване на масата на частиците във въздуха на единица обем въздух, изразена в $\mu\text{g}/\text{m}^3$.



Фиг. 3.1 Блок-схема на разработената система за онлайн мониторинг на ФПЧ

3.1.2.2 Софтуер

Основните стъпки в комуникацията клиент - сървър са следните:

- Уеб сървър и клиент се свързват чрез HTTP протокол;
- Съответната страница се предава на браузъра като HTML код и се визуализира;
- Клиентът въвежда данните и изпраща заявката до сървъра;
- В зависимост от заявката сървърът извлича файла и подготвя графика с концентрацията на РМ за избрания период от време;
- Резултатът от изпълнената заявка се получава от браузъра и се вгражда в HTML страница за да може да се интерпретира от клиента.

3.1.3 Експериментални резултати

3.1.3.1 Калибриране на сензора за ФПЧ

Фиг. 3.5 илюстрира процедурата калибриране чрез съвместно разполагане на устройства калибриране [106].

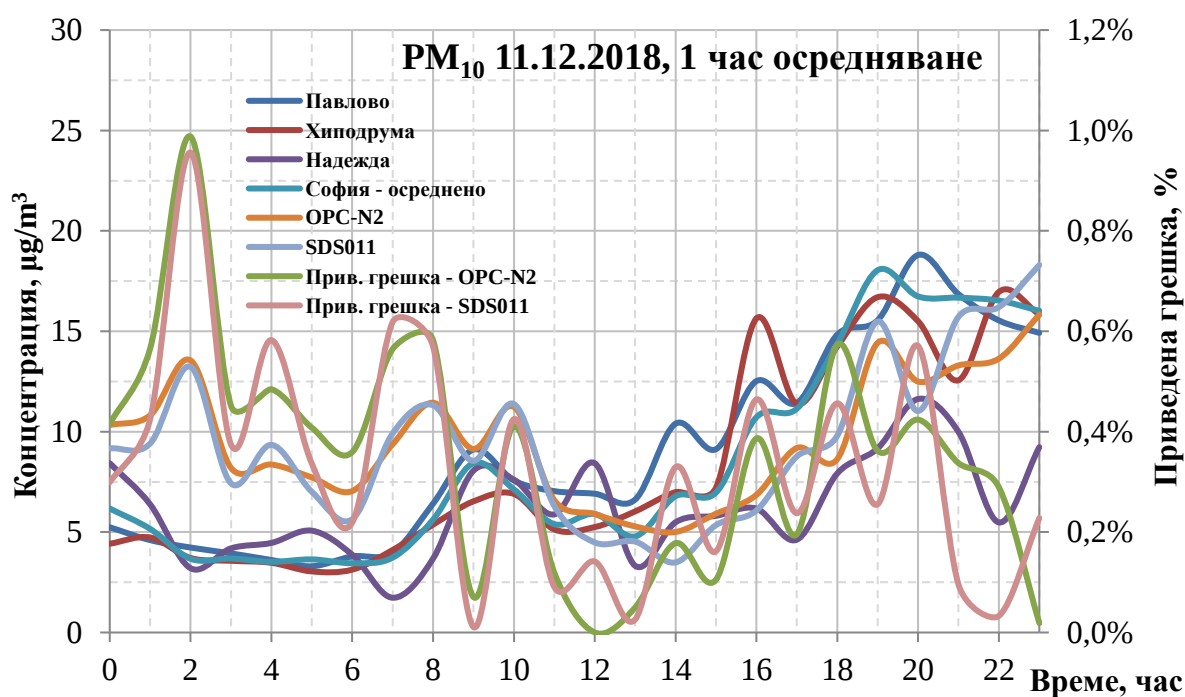
Разработеният сензорен модул осигурява актуализиране на параметрите за калибриране, като се използват публично достъпни висококачествени измервания от статични референтни станции, поддържани от официалните органи [107].

При калибрирането се използват данните от нискобюджетните сензори за определен период, а наличните референтни измервания за този период се извличат от мрежата. И двата набора от данни се филтрират и се получават осреднени данни за определени интервали (напр. 1 – 5-10 мин.) които позволяват по-лесно „синхронизиране“ на данните за по-лесното им сравняване.

С помощта на сензора за ФПЧ са проведени няколко продължителни теста в градската зона на София. Резултатите след извършеното калибриране на сензорите OPC-N2 и SDS11 могат да се видят на Фиг. 3.6, като приведената грешка е изчислена към максималния обхват на сензора SDS011, която е $999,99 \mu\text{g}/\text{m}^3$ за PM_{10} .



Фиг. 3.5 Процедура за калибриране чрез съвместно разполагане на устройствата. Измерванията в близост до референтна станция се използват за актуализиране на параметрите за калибриране

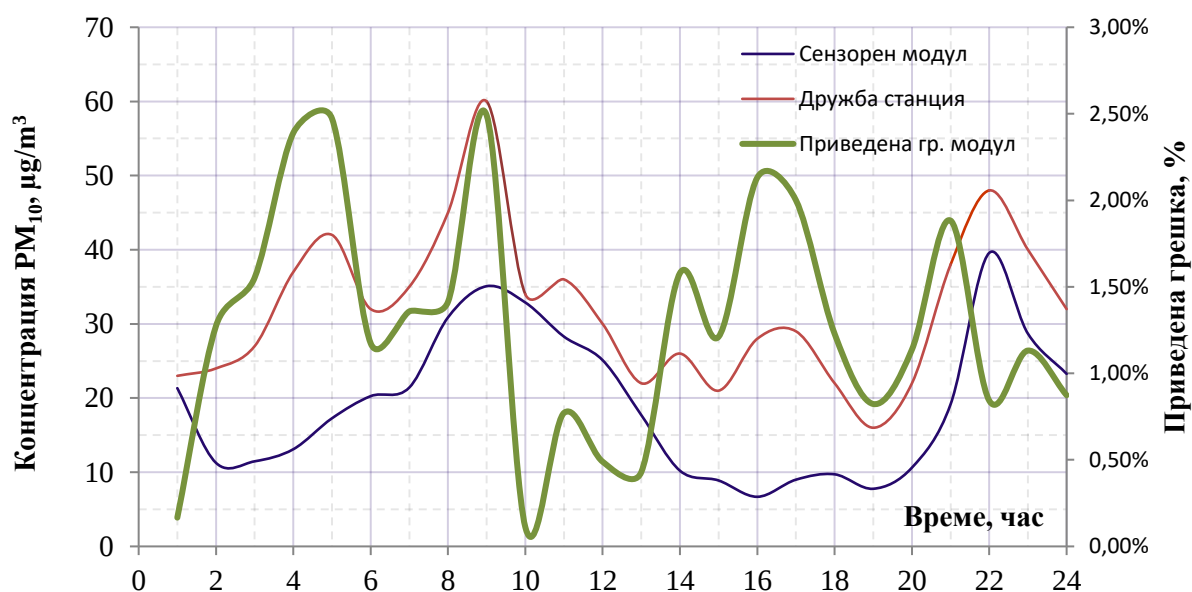


Фиг. 3.6 Данни от референтните станции и калибрираните сензори OPC-N2 и SDS011

3.1.3.2 Събиране на данни

Полеви изследвания

При полеви тестове на системата, резултатите от измерванията с нея са съпоставени с данните от фиксираната станция за мониторинг на качеството на въздуха в София - Дружба. Концентрацията на PM_{10} , измерена със сензорната система и фиксираната автономна станция за период от 24 часа, е показана на Фиг. 3.12. На същата фигура е визуализирана и приведената грешка в % на сензорния модул отнесено към максималния обхват на устройството, който е $999,9 \mu g/m^3$.

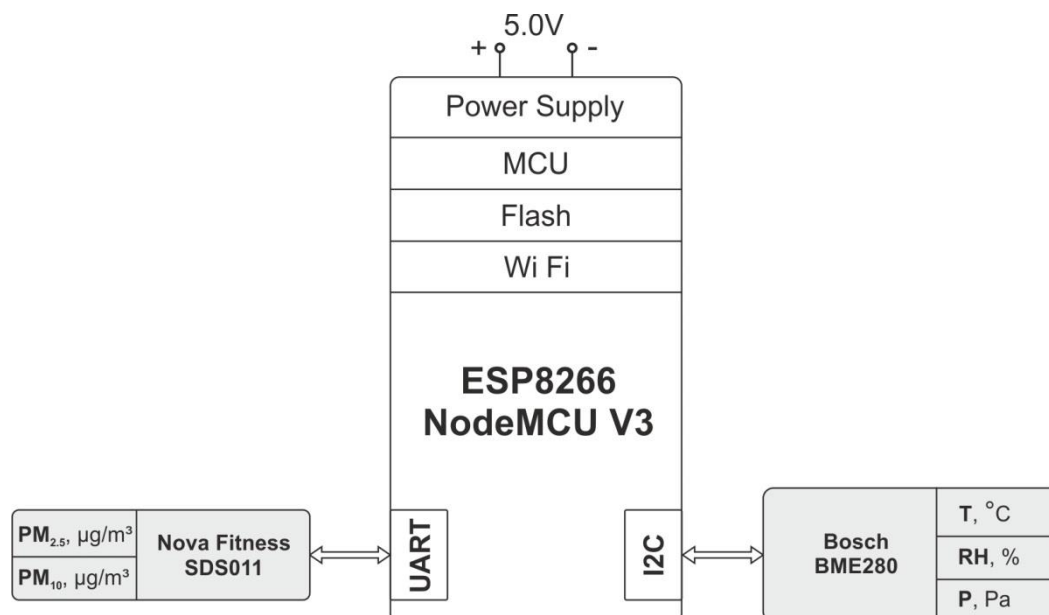


Фиг. 3.12 Измервания на концентрацията на PM_{10} за 1 денонощие (осреднени стойности за 1 час) в близост до фиксираната станция Дружба, София на 13 април 2017 г.

3.2 Експериментални изследвания на станции в мрежата AirBG

3.2.2.1 Хардуерна конфигурация на станцията

Предложената система от доброволците на AirBG се базира на лесно достъпни и евтини компоненти, които от друга страна са надеждни и лесни за работа дори и от непрофесионалисти и аматьори в областта на електрониката. Блок-схемата е показана на Фиг. 3.14. Основен компонент в нея е системата върху чип ESP8266.

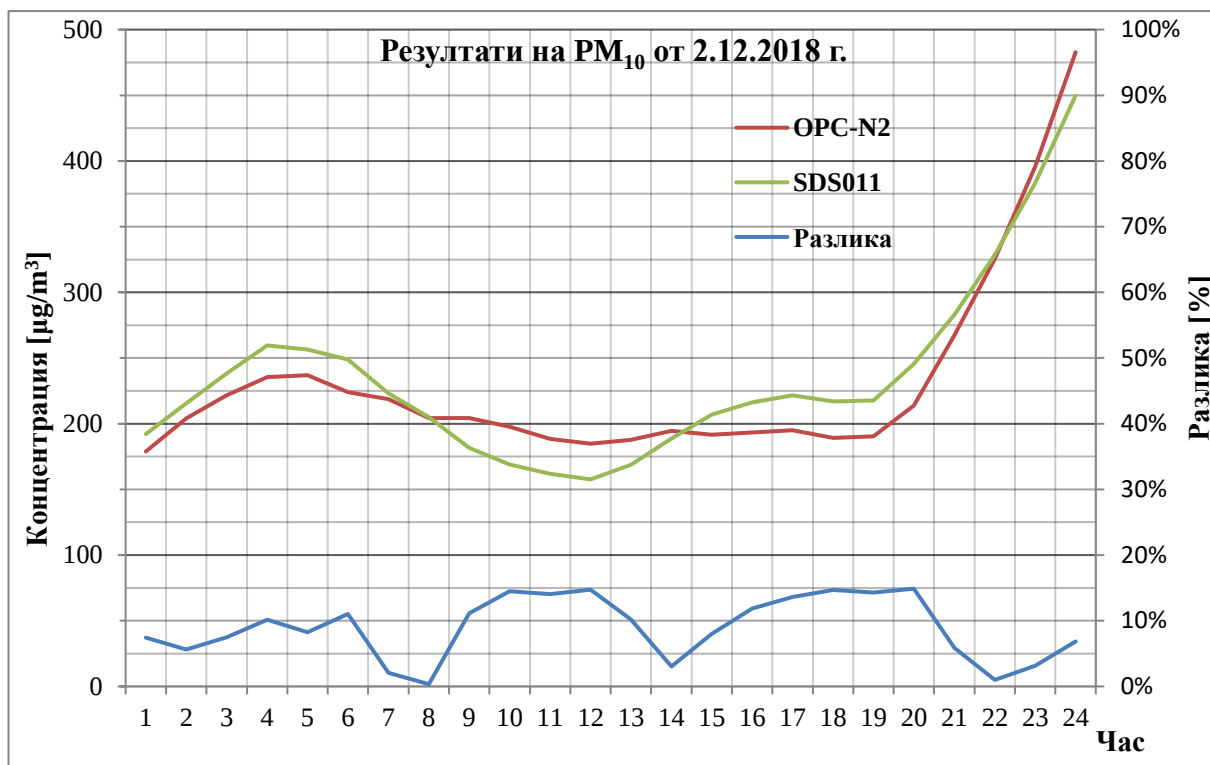


Фиг. 3.14 Блок-схема на станцията на AirBG

3.2.2 Експериментални резултати

Данните от всички станции по проекта на AirBG се записват на сървър за данни на въздуха (luftdaten) и могат да бъдат изтеглени за всеки ден в текстови формат с разделител

точка и запетая. От там са изтеглени данните за станцията, намираща се на географска ширина 42,707729° север и дължина 23,310026° изток за дата 2.12.2018 г.. За същия ден, в непосредствена близост до сензора SDS011 е монтиран и референтен сензор. Измерените резултати са представени на Фиг. 3.22 заедно с референтния оптичен сензор за ФПЧ – OPC-N2. OPC-N2 е производство на Alphasense и е висококачествен уред за измерване на ФПЧ с размери от 0,38 μm до 17,0 μm и е в ценовия диапазон от 300 – 400 € [104].



Фиг. 3.22 Резултати от измервания на PM_{10} от дата 2.12.2018 г.

Резултатите показани на Фиг. 3.22 са предварително обработени чрез функцията „Плъзяща средна стойност“ (Simple moving average) показана на (3.3).

$$\bar{P}_{SM} = \frac{P_M + P_{M-1} + \dots + P_{M-(n-1)}}{n} \quad (3.3)$$

където:

$\bar{P}_{SM}$ – осреднена стойност от последните n измерени стойности за концентрация PM_{10}

P_M – стойност на измерената концентрация PM_{10}

n – брой на осредняваните елементи

3.3 Мобилен мониторинг чрез безпилотни летателни апарати

3.3.1 Проектиране мобилни сензорни системи използващи БЛА

Настоящото изследване има за цел да се проучат проблеми на внедряването на БЛА за дейности по мониторинг на околната среда.

Основни задачи за постигането на целта са

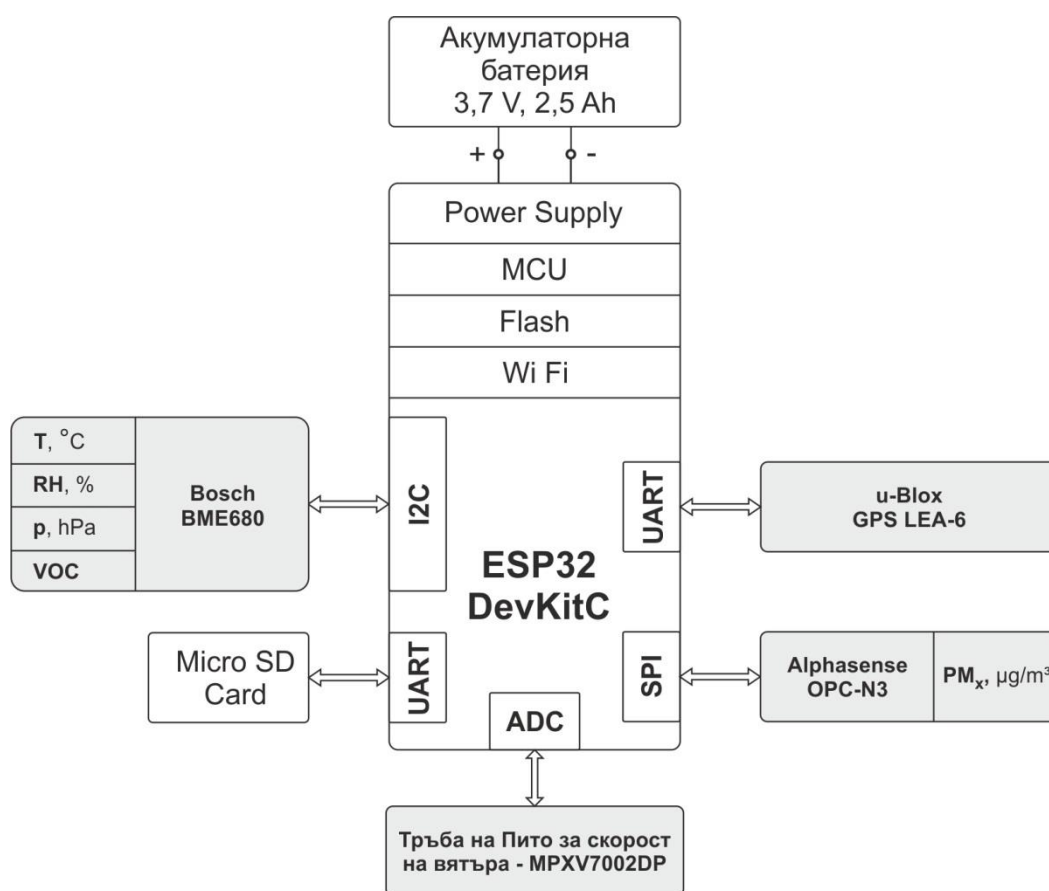
- Събиране на данни чрез сензорно оборудвани БЛА и интегрирането им в безжични сензорни мрежи.
- Събиране на данни за замърсяването на въздуха на различни височини.

Квадрокоптерите са предпочитаната платформа за мониторинг, поради тяхната способност поддържане на статично положение продължително време (hovering). При тях, сериозно предизвикателство, особено за сензорите за качество на въздуха, е влиянието на въздушните струи, създадени от движението на роторите. Проблемът за избора най-добрите разположения на сензорите е изследван в [116] на основата физичната структура на квадрокоптера. За съжаление, такива изследвания трябва да се извършват за всеки модел БЛА, тъй като тяхната форма е доста различна. Често използван подход е използването на удължения за засмукване на въздуха извън основните въздушни струи.

3.3.2.1 Сензорен модул

Архитектурата на модула за мониторинг на прах е представена на Фиг. 3.24. Информацията от всеки сензор (напр. прах, налягане, температура и влажност) е изпратена на наземна станция чрез Wi-Fi безжична връзка за наблюдение и запис в микро SD карта, използвана от ESP32.

Общото тегло на модула за изследване е 350 g и има следните размери: 14,0 cm×9,0 cm×10,0 cm.



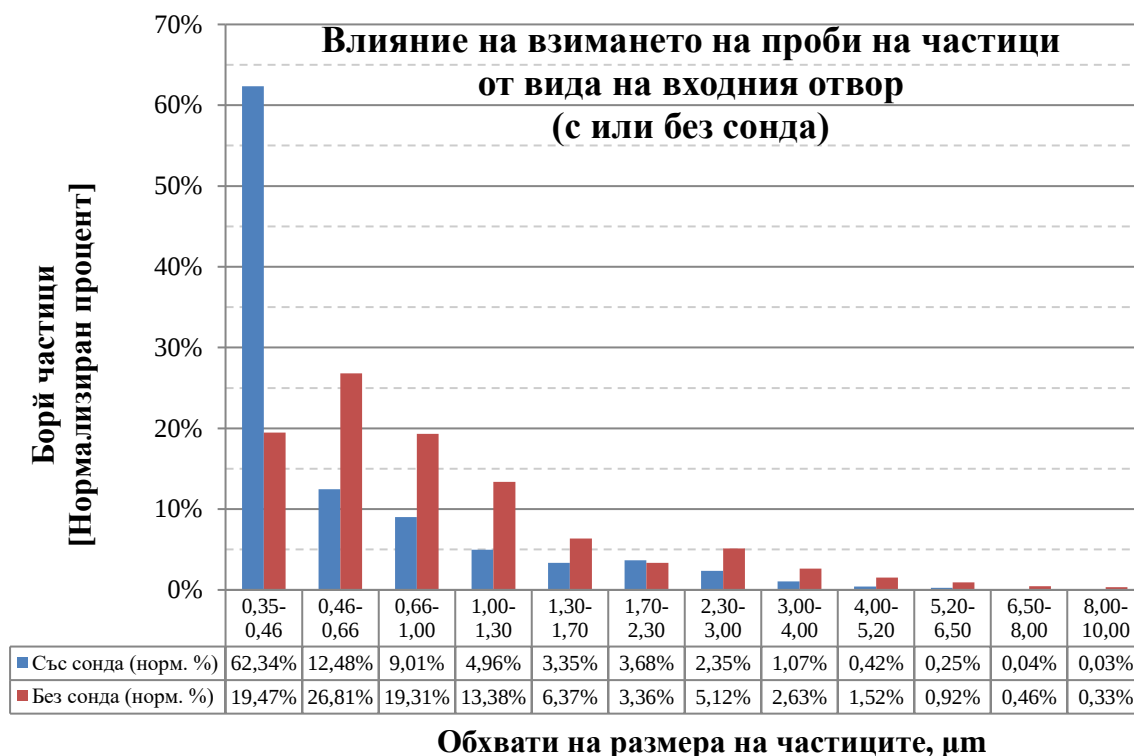
Фиг.3.24 Архитектура на сензорния модул

3.3.3 Експериментални резултати

3.3.3.2 Влияние на скоростта на вятъра и на вида на отвора за вземане на проби

Фиг. 3.27 показва нормализираните данни и влиянието на вземане на проби с и без сонда, класифицирани по диаметър на размера на частиците (използвайки контейнерите, на OPC-N3). Наблюдава се, че при частиците, вариращи от 0,35 до 0,46 µm, се установяват най-големи разлики. При използване на сондата, броят на частиците надминава с повече от 40

%. Те са следвани от частици, вариращи от 0,54-1,59 μm , където процентната разлика е почти 10 %, но тук завишението е при измерванията без сонда. Тази тенденция се запазва за частиците с размер до около 3 μm .



Фиг. 3.27 Влияние на използването на сонда за вземане на проби, върху показанията за концентрация на частици с различни размери

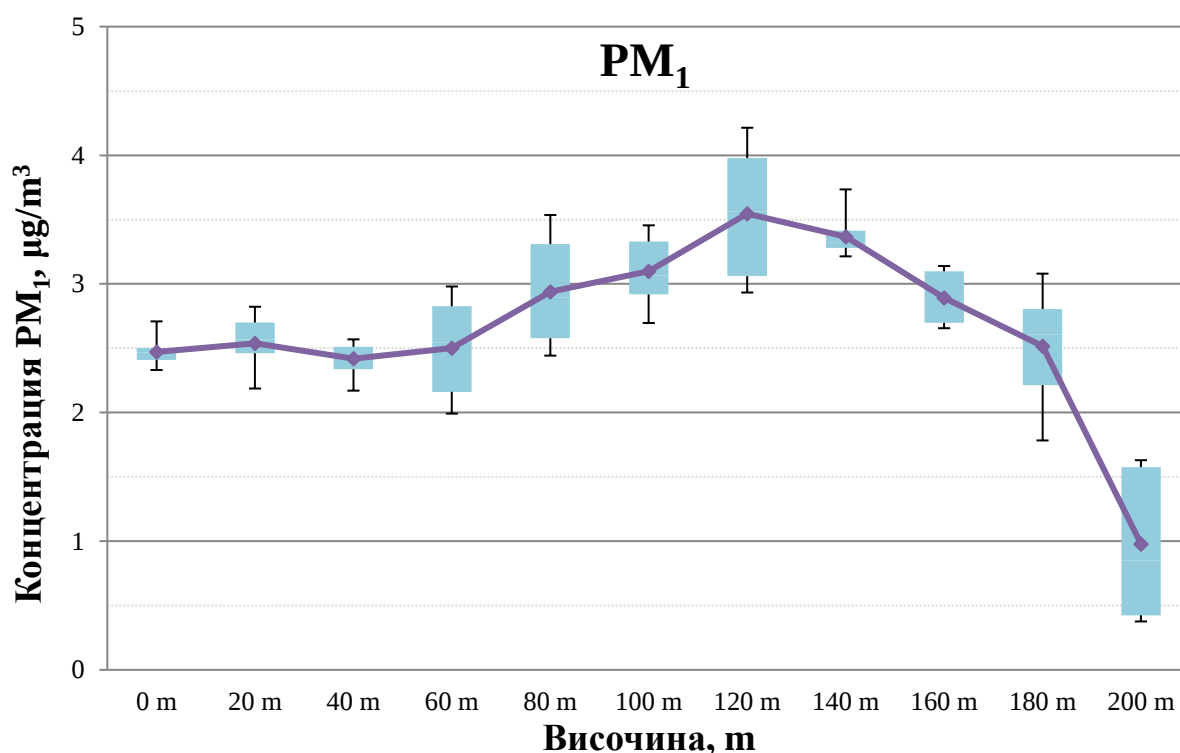
3.3.3.3 Вертикално разпределение на концентрацията на ФПЧ

Експеримента цели да покаже вертикалното разпределение на ФПЧ. Измерването беше проведено на 10 май 2019 г. като бяха направени измервания на концентрацията на всеки 20 m височина за по 40 секунди всяко. Максималната достигната височина е 200 m като взимането на пробите е реализирано чрез използване на сонда. Резултатите от измерването за вертикалното разпределение на концентрациите на PM_{10} са показани на Фиг. 3.30. На фигурата се забелязва, че с увеличаване на височината се увеличава и концентрацията на ФПЧ, като това продължава до около 100 - 120 m и след това започва да спада, като се стига до височина, например 200 m, при която осреднената стойност за концентрацията на ФПЧ е с около 50 % по-малка от колкото при 0 m.

3.4 Изводи

В това изследване е представено проектирането и реализацията на сензорна система за измерване в реално време на концентрациите на ФПЧ с различни размери с помощта на полупрофесионални оптични сензори. Резултатите от проучването показват, че те имат значителни предимства в сравнение със сензорите от най-ниския ценови сегмент (10 - 20 €) [39]. Те могат да работят с приемлива точност при оценяването на експозициите на ФПЧ и са подходящи за вграждане в мобилни устройства. Ако са правилно калибрирани, те биха могли да предоставят полезни данни при проучвания за ефектите върху здравето на ФПЧ и да допълват данните за концентрации на ФПЧ предоставяни от фиксираните станции за мониторинг. Компактният размер на тези монитори и гъвкавостта при събирането на данни, възможностите за комуникация и интегрирането на хардуер за локализация на открито

благоприятстват широкото им приложение в широкообхватни изследвания за замърсяването с ФПЧ.



Фиг. 3.30 Вертикалното разпределение на концентрациите на PM_{10}

ГЛАВА 4. МОБИЛНИ СИСТЕМИ ЗА МОНИТОРИНГ НА КАЧЕСТВОТО НА ВЪЗДУХА

4.1 Сензорна система OutSense – архитектура

Тук е представена разработената система с наименование OutSense. На Фиг. 4.1 е показана архитектурата на системата, която включва няколко основни компонента: сензорни модули, безжични рутери, сървърни и крайни устройства. Така предложената система отговаря на изискванията за Интернет на Нещата (Internet of Things – IoT), която се характеризира с отдалечено събиране на данни и споделянето им чрез интернет и/или облачни услуги.

4.1.1 Сензорен модул

Сензорните модули измерват концентрацията на основните замърсители на въздуха и изпращат получените данни на уеб сървър. За удължаване на живота на батерията на модула се използва механизъм, при който се редуват режими на измерване и енергоспестяващи режими. Работата на сензорните модули е с цикличност 10 минути.

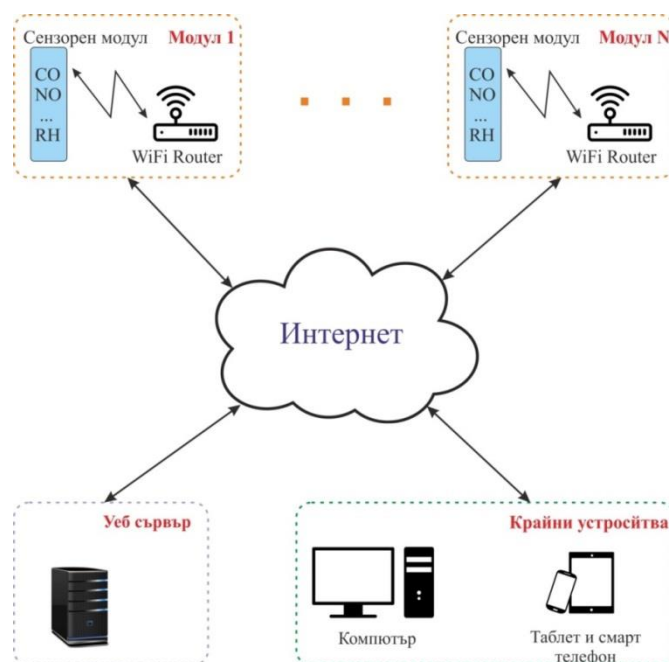
4.1.3 Реализация

4.1.3.1 PIC платформа и периферни модули

Блок-схемата на разработения сензорен модул е показана на Фиг. 4.2.

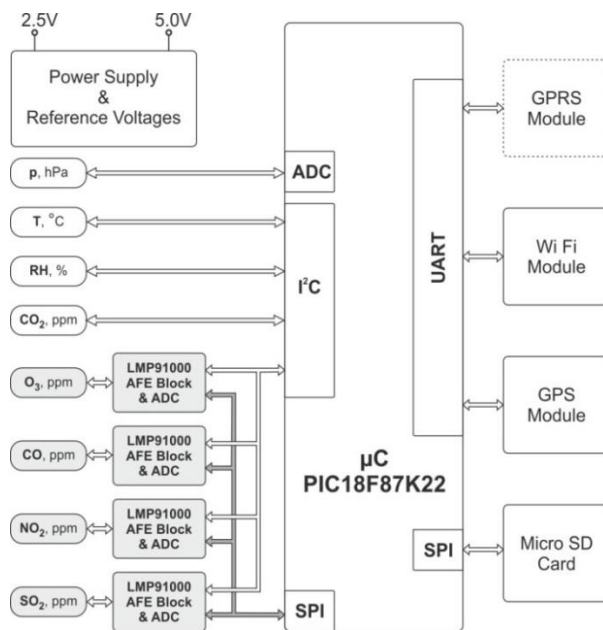
В предложеният подход за измерване на параметрите на качеството на въздуха се използва микроконтролер PIC18F87K22 от Microchip. Той осигурява управлението на

измервателните процедури на сензорите и предварителна обработка и съхранение на получените данни на външна памет.



Фиг. 4.1 Архитектура на сензорната система

Електронният модул може да измерва няколко основни замърсители и параметри на въздуха.



Фиг. 4.2 Блок-схемата на разработения сензорен модул

Към този микроконтролер е свързан чрез сериен интерфейс GPS модулът от Adafruit - Ultimate GPS модул, базиран на чипсет MTK3339. Неговите основни характеристики са висока чувствителност (-165 dBm), ниска консумация на енергия (20 mA), вътрешна антена и малки размери.

За Wi-Fi връзката използвахме модул, базиран на чипсет ESP8266. Това е евтино решение, с добра чувствителност и много ниско потребление на енергия режим на предаване – 140 mA.

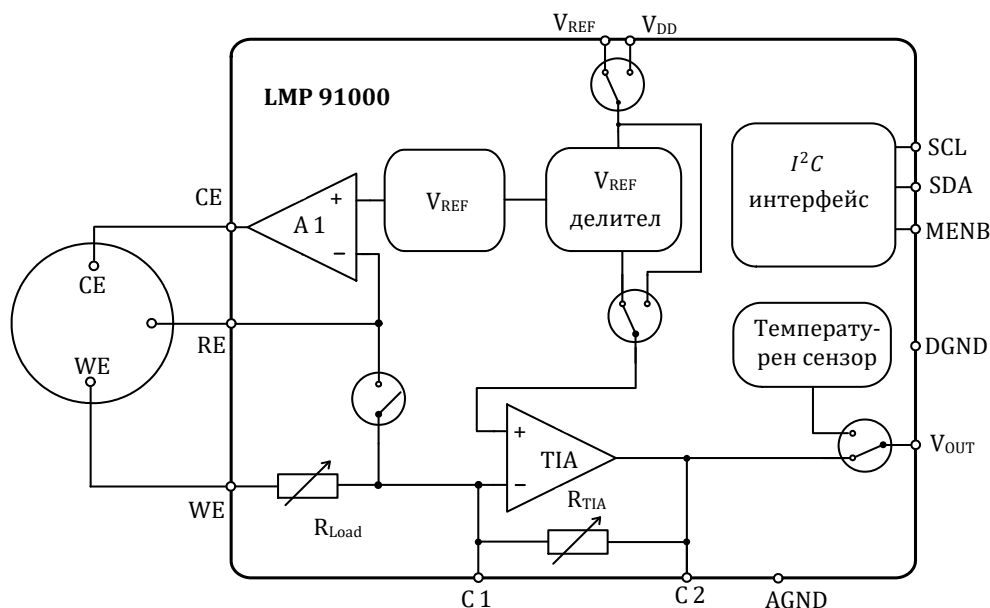
4.1.3.2 Сензори

Газови сензори

За въглеродния оксид се използва сензор CO-AF от Alphasense с обхват от 0 до 5 000 ppm, за азотен диоксид - NO₂-A42F сензор, за озон - O₃-A421 и за кислород - O₂-A2 сензор [121]. Тези сензори използват програмируем аналогов входен блок (Analogue Front End - AFE) LMP91000 от Texas Instruments. Той осигурява цялостно решение на пътя на сигнала между сензорите и микроконтролера, което генерира изходно напрежение, пропорционално на тока на сензорната клетка. Изходното напрежение на AFE се измерва чрез външен АЦП с 16-битова разделителна способност, разположено близо до LMP91000 за намаляване на шума. Въглеродният диоксид се измерва с помощта на сензор K30, чрез недисперсионен инфрачервен принцип, произведен от SenseAir и има работен обхват до 5 000 ppm.

LMP91000 е програмируем аналогов входен блок, проектиран за работа с три-електродни и дву-електродни амперометрични газови сензори. Схемата дава възможност за лесно отчитане на промени в газовата концентрация въз основа на изменението на тока в работния електрод. Чрез трансимпедансен усилвател се генерира изходно напрежение пропорционално на тока на сензора. Коефициентът на усилване е програмируем по I²C интерфейс и дава възможност за измерване на ток в обхвата от 5 μ A до 750 μ A.

Основните компоненти на схемата са както и при конвенционалните потенциостати, управляващ усилвател и преобразувател ток-напрежение (виж Фиг. 4.3) [122].



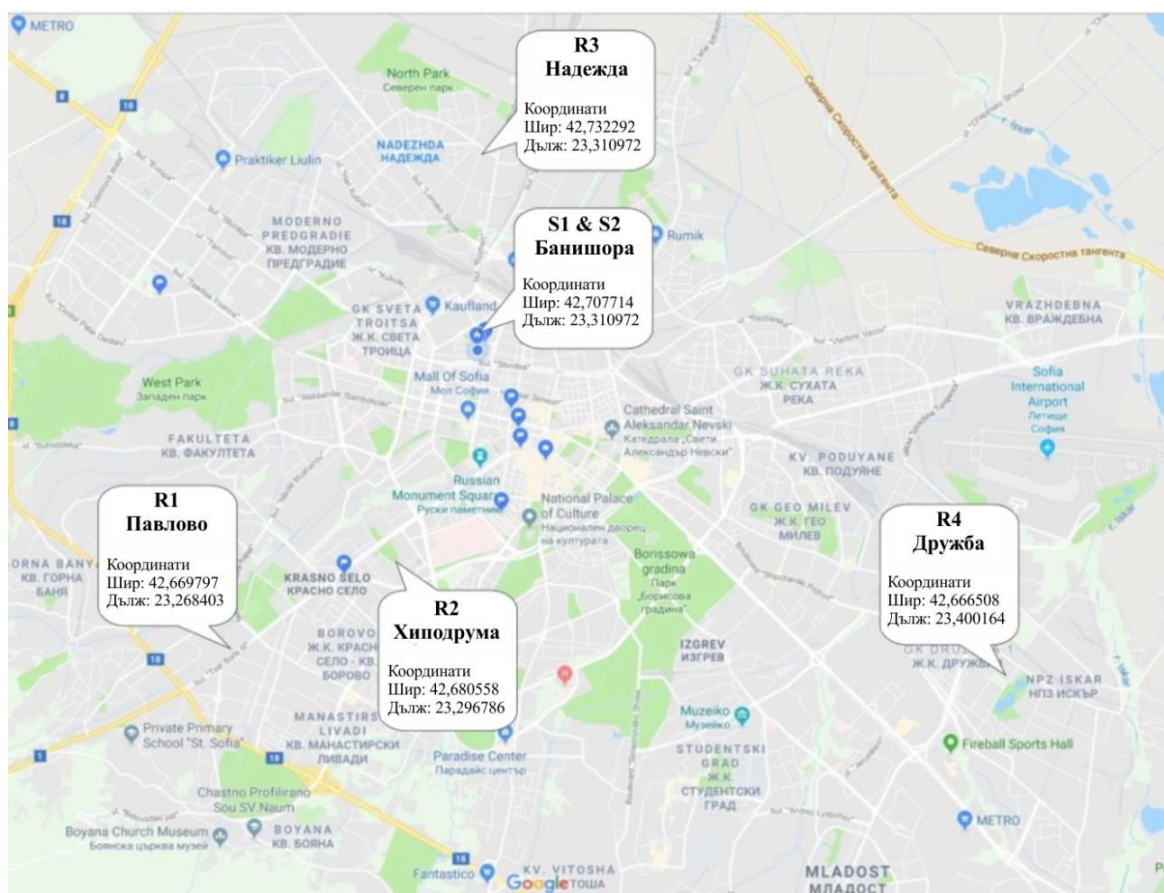
Фиг. 4.3 LMP91000 – Конфигурация за включване на сензор с 3 електрода

4.1.4 Калибриране на сензорния модул

За калибриране на сензорния модул е използвано т.нар. „сляпо“ или макро калибриране, което е по-подходящо за използване при замърсители с по-малка динамика на изменение на концентрациите, като напр. озон. Основното предположение при това калибриране е, че то се прави, като се вземат данни от сензорни мрежи при ситуации, при които сензорите разположени в даден регион измерват приблизително еднакви концентрации на изследваните замърсители [125].

В този случай, амперометричните сензори за газ се калибрират въз основа на показанията на фиксираните станции, разположени в района на северозападната част на

София. Използва се ситуация, при която в рамките на часове показанията в цялата зона не се различават повече от 5-10 %. Примерен сценарий за калибриране на сензори в градска среда е показан на Фиг. 4.5.

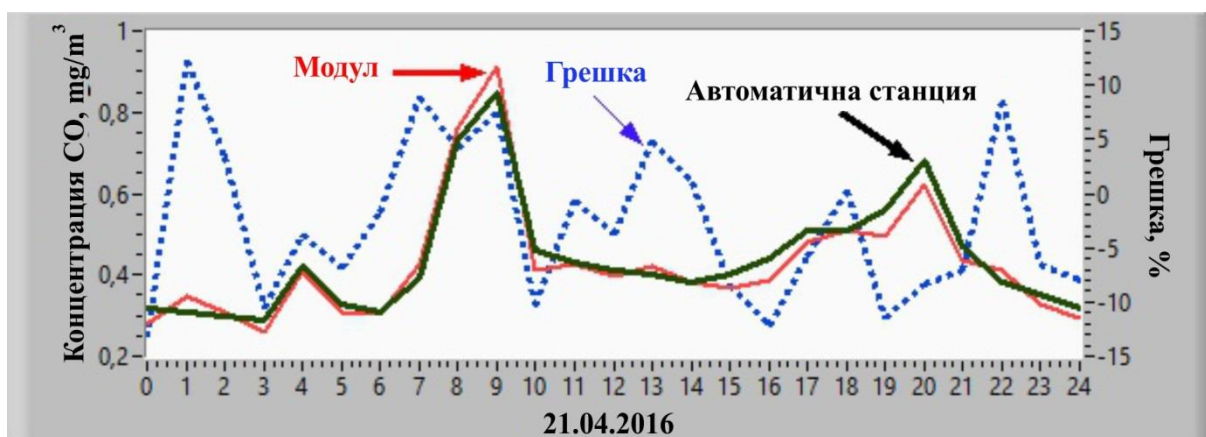


Фиг. 4.5 Сценарий за калибриране на сензори в градска среда

S1 и S2 са сензори, които се калибрират в градски условия, R1, R2, R3 и R4 са референтни измервателни станции или сензори, които са разположени в близост. Калибрирането с помощта на показанията от референтните станции се извършва по време, когато с голяма вероятност може да се предположи, че показанията на всички сензори са приблизително идентични.

4.1.5 Експериментални резултати

За проверка на точността на получените резултати, се прави сравнение с измерванията на съответните фиксирани измервателни станции на Сточна община. Тези измервания се правят непрекъснато и се публикуват ежедневно на уебсайт [126]. Модул 3 е позициониран на разстояние по-малко от 200 m от автоматичната измервателна станция. Както може да се види от резултатите на Фиг. 4.8, стойностите, получени от Модул 3 в повечето случаи са доста близки до тези на автоматичната измервателна станция.



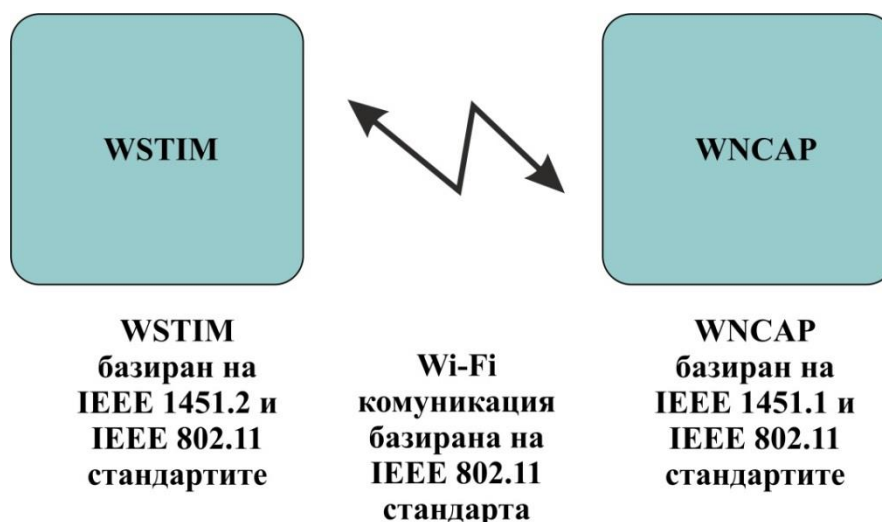
Фиг. 4.8 Стойностите на CO, измерени с Модул 3 и стойности, предоставени от фиксираната станция за мониторинг на околната среда - Автоматична станция № 3 - Младост.

4.2 Интелигентна сензорна система за мониторинг на качеството на въздуха

4.2.1 Проектиране

Основна цел при проектирането на системата е структурирането ѝ според изискванията на фамилията стандарти IEEE 1451 за интелигентни преобразуватели (сензори и изпълнителни механизми) [26, 30]. Необходимо е да се проучи, може ли чрез използването на този стандарт да се изградят системи, които подлежат на лесна модификация/скалиране и отговарят на нуждите на както на специалистите в областта на екологичния мониторинг така и на масови потребители.

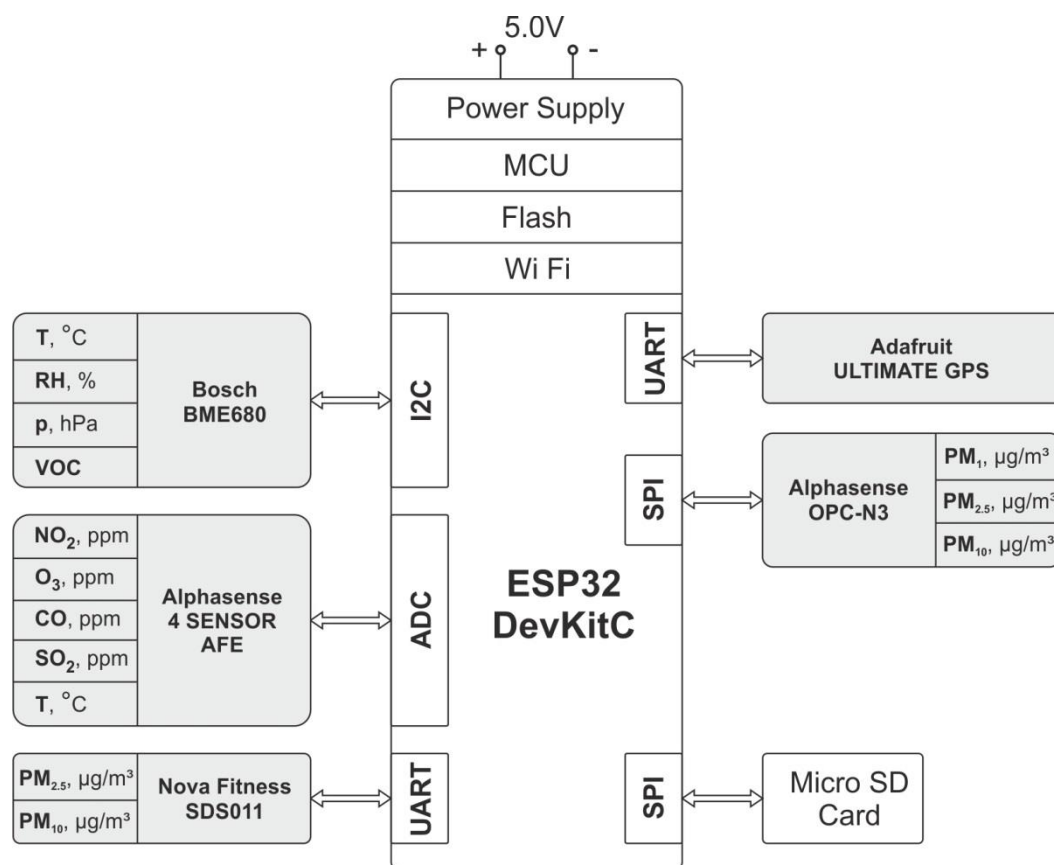
За да се реализират целите на проектирането, безжичният сензорен модул (STIM) и безжичният мрежов процесор (NCAP) са разработени според фамилията стандарти IEEE 1451. Връзката между NCAP и STIM е безжична на базата на Wi-Fi (Фиг. 4.10).



Фиг. 4.10 Блок-схема на интелигентната сензорна система

4.2.2.1 Мобилен сензорен модул за мониторинг качеството на въздуха

Разработеният сензорен модул за мониторинг на качеството на въздуха е цялостна мащабируема система за мониторинг в реално време и за запис на данни. Подробната блокова диаграма на модула е показана на Фиг. 4.11. Състои се от основна и разширителни платки.



Фиг. 4.11 Блок-схема на разработения сензорен модул

Сензори

Разработеният сензорен възел може да се използва за измерване на концентрацията на основните замърсители на въздуха като NO_2 , O_3 , CO, SO_2 и ФПЧ.

Измерват се и други основни физически параметри - атмосферно налягане, относителна влажност, температура и концентрация на ЛОС.

Калибриране

При някои 4-електродни електрохимични сензори изходния сигнал съдържа концентрацията освен на основния газ, който се измерва и на друг(и) газове, които не могат да бъдат елиминирани физически чрез филтри в самия сензор. Поради този ефект се налага да се направи калибриране на измерената концентрация и да се премахне компонента породен от нежелания за измерване газ.

За нуждите на калибрирането ще се направят няколко дефиниции. 4-електродните сензори имат два изходни сигнала: Ток на работния електрод (I_{Work}) и ток на допълнителния електрод (I_{Aux}). Трите калибрационни измервания (точка нула, газ 1 и газ 2 калибриране) дават три различни стойности за двата сигнала: $I0_{Work}$, $I1_{Work}$, $I2_{Work}$ и съответно $I0_{Aux}$, $I1_{Aux}$, $I2_{Aux}$.

Калибриране на нулата

$I0_{Work}$ и $I0_{Aux}$ се определят с калибриране на точка нула на чист въздух при температура T_0 .

Калибриране на газ 1

Газова смес X с концентрация $G1_X$ се прилага на сензора при температура T_0 и се получават $I1_{Work}$ и $I1_{Aux}$.

Калибриране на газ 2

Газова смес XY с концентрации $G2_X$ и $G2_Y$ се прилагат на сензора при температура T_0 и се получават $I2_{Work}$ и $I2_{Aux}$.

Изчисления

$$a = \frac{I1_{Work} - I0_{Work}}{G1_X} \left[\frac{\mu A}{ppm} \right] \quad (4.2)$$

$$c = \frac{I1_{Aux} - I0_{Aux}}{G1_X} \left[\frac{\mu A}{ppm} \right] \quad (4.3)$$

$$b = \frac{(I2_{Work} - I0_{Work}) - a \cdot G2_X}{G2_Y} \left[\frac{\mu A}{ppm} \right] \quad (4.4)$$

$$d = \frac{(I2_{Aux} - I0_{Aux}) - c \cdot G2_X}{G2_Y} \left[\frac{\mu A}{ppm} \right] \quad (4.5)$$

$$Gain = \frac{b}{d} [-] \quad (4.6)$$

$$Sensitivity = a - Gain \cdot c \left[\frac{\mu A}{ppm} \right] \quad (4.7)$$

Изчисляване на концентрацията ppm

Веднъж сензорът калибриран, за показване на правилната концентрация X при температура T_0 :

$$X = \frac{I_{Work} - Gain \cdot I_{Aux}}{Sensitivity} [ppm] \quad (4.8)$$

За намиране на концентрацията на газовете използвайки напрежение се използва следната зависимост [135]:

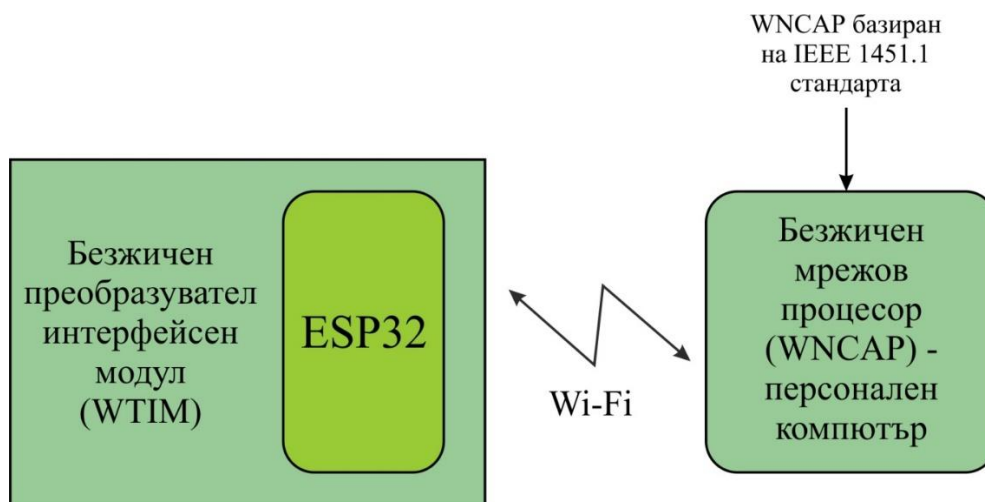
$$c = \frac{(U_{WE} - U_{WE0}) - (U_{AE} - U_{AE0})}{S} [ppb] \quad (4.10)$$

където c е измерената концентрация на газ в ppb , U_{WE} и U_{AE} са измерените напрежения на съответните електроди в mV , U_{WE0} и U_{AE0} са отместванията на нулата на електродите в mV , S е общата чувствителност в mV/ppb .

4.2.2 NCAP

Комуникацията между безжичния стандартен сензорен интерфейсен модул (WTIM) и безжичния мрежов процесор (WNCAP) се постига чрез Wi-Fi комуникационен модул.

Разработеният WNCAP модул е показан на Фиг. 4.14.



Фиг. 4.14 Блок-схема на модула WNCAP

Модулът WNCAP е разделен на две части – Wi-Fi модул и графичен потребителски интерфейс (GUI). GUI е реализиран в средата на LabVIEW. Той изпълнява всички функционалности като приемане на сигнали, визуализация и съхранение на данни на твърд диск. Разработеният преден панел има бутон за стартиране, функции за настройване на честотата на измерване, цифров и графичен изход, запис на данни и бутон стоп.

4.2.3 Валидиране / Експериментални резултати

Калибриране на сензорния модул

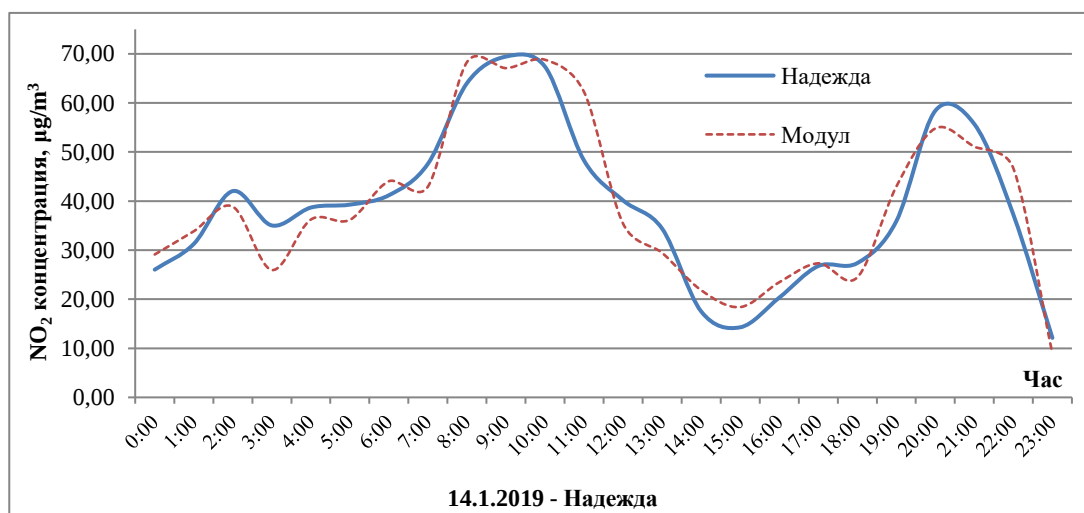
Известно е, че замърсяването на въздуха е много сложна система с големи пространствено-времеви градиенти [125]. За калибриране на сензорния модул е използвано т.нар. „сляпо“ или макро калибриране. Основното предположение при това калибриране е, че то се прави, като се вземат данни от сензорни мрежи при ситуации, при които сензорите разположени в даден регион измерват приблизително еднакви концентрации на изследваните замърсители или показанията им са с голяма корелация [137].

В това изследване, амперометричните сензорите се калибрират въз основа на показанията на фиксирания станции, разположени в няколко района на София. Използвани са ситуации, при която в рамките на 24 часа показанията в района не се различават повече от 5-10 %.

Валидиране на измерванията

С помощта на модула за мониторинг на качеството на въздуха са проведени няколко непрекъснати теста в градската зона на София. Резултатите след извършеното калибриране на сензора за азотен диоксид могат да се видят на Фиг. 4.15. Измерванията със сензора са сравнени с измерванията, получени от общинския орган за контрол на околната среда. Използвани са стойностите от обществената станция в квартал Надежда/Банишора в София, която е най-близо до експерименталния сензорен модул.

Когато сравним измерванията на нивата NO_2 , може да се види, че няма значителни разлики между показанията на амперометричния сензор с тези на фиксирания автоматична станция. Има само две по-значими отклонения по време на 24-часовия период. Нивата на абсолютната грешка в повечето измервания не надвишават $\pm 15 \mu g/m^3$. Изчислените коефициенти на корелация между данните, получени от сензорния модул след калибриране на сензора за азотен диоксид показват повишение до нива от 0,65 - 0,78. Това е значително повишение спрямо установените преди калибрирането нива в интервала 0,45 - 0,60.



Фиг. 4.15 Измервания на азотен диоксид в район София-Надежда/Банишора

4.3 Изводи

Използването на системи за многопараметрично измерване на качеството на въздуха позволява да се направи подробен анализ на нивата на замърсяване и за локализиране на основните източници на замърсяване. Тези измервателни системи са важни компоненти в много реални Smart-City-проекти [138].

Представените изследвания в тази глава на дисертационния труд представят развитието на мобилни мултисензорни модули за наблюдение в реално време на важни параметри на околната среда. В сравнение с други решения, описани в литературата, настоящото решение разчита на малки, сензорни модули с ниска консумация на енергия, снабдени акумулаторни батерии и Wi-Fi комуникационни модули. По този начин те могат лесно да бъдат преместени и разгърнати в области, където има Wi-Fi покритие.

Необходимо е да се отбележи, че качеството на измерените данни, предоставени от сензорните възли, до голяма степен зависи от точността на сензорите. С развитието на технологиите ще се предоставят по-точни икономични сензори и ще се подобрява качеството на данните. От тази гледна точка внедрените възли могат да се разглеждат като развиваща се платформа за мониторинг с ниски разходи, чието качество може непрекъснато да се подобрява с развитието на сензорните технологии.

Интернет на нещата предоставя възможност за значително разширяване на мониторинга на качеството на въздуха чрез ниско бюджетни системи и ново поколение сензорни елементи, които са достъпни и лесни за разгръщане. Най-новите сензорни и електронни технологии позволяват разработването на евтини миниатюрни сензорни модули за откриване на замърсители като озон, метан и NO_x, които представляват интерес за програмите за мониторинг на здравето и околната среда в световен мащаб. Чрез осъществяването на широко обхванат мониторинг за събиране на надеждни данни за качеството на въздуха, тези модули могат да играят важна роля за предотвратяване на заболявания, свързани с лошото качество на въздуха на открито, и да удължат продължителността на живота навсякъде.

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

- Формулирани са изисквания към мобилните устройства за мониторинг на въздуха и са определени перспективни направления за тяхното развитие.
- Извършено е проектиране и реализация на сензорна система за онлайн мониторинг на концентрациите на фини прахови частици с различни размери с помощта на полупрофесионални оптични сензори.
- Реализирани са сензорни станции по проекта AirBG и е изследвана точността им, като са използвани данни от стационарни станции за следене качеството на въздуха.
- Разработена е сензорна система, монтирана на мулти-роторен безпилотен летателен апарат и са изследвани специфични ситуации при измерване параметри на въздуха на различни височини и обработка на сензорните данни.
- Разработен е мобилен мултисензорен модул за наблюдение в реално време на основни замърсители на въздуха. В сравнение с публикуваните решения, предложеното решение използва нискобюджетни сензори с ниска консумация на енергия и безжични комуникационни модули.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. M. Marinov, I. Topalov, S. Lukin, Temperature sensor network using the 1-Wire interface. 11th International Scientific and Applied Science Conference - ELECTRONICS 2002, Sozopol, 25. 27.09.2002, Vol. 2, pp. 9 - 14.
2. M. Marinov, T. Djamiykov, I. Topalov, M. Donschewa. Environmental Data Acquisition Based on 1-Wire Interface. Proc. 13th International Scientific and Applied Science Conference - ELECTRONICS 2004, Sozopol, 22. 24.09.2004, Vol. 2, pp. 70 - 75.
3. M. B. Marinov, Ivan Topalov, E. Gieva and G. Nikolov. Air Quality Monitoring in Urban Environments. 39th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), 18-22 May, 2016, Pilsen Czech Republic, pp. 443-448, ISSN: 2161-2528, DOI: 10.1109/ISSE.2016.7563237.
(Scopus, SJR 0,148, 7 цитата: <https://www.scopus.com/record/pubmetrics.uri?eid=2-s2.0-84988882823&origin=recordpage>)
4. E. Janchevska, M. B. Marinov, I. Topalov, G. Nikolov. Mobile Air Quality Index Monitoring System. International Conference on Sustainable Development, ICSD 2016, 19-23, October, 2016 Skopje, Macedonia.
5. Ivan Topalov, Location based calibration of low cost particulate matter sensors. Proceedings of the 8th FDIBA Conference - Technologies and Education for a Smart World, 30 November 2018, Sofia, Bulgaria, vol. 2, 2018, pp. 43-46.
6. Marin B. Marinov, I. Topalov, B. Nikolova, G. Nikolov and T. Djamiykov. Smart Multisensor Node for Environmental Parameters Monitoring in Urban Areas. Proc. X National Conference with International Participation Conference "Electronica 2019", May 17-18, 2019, Sofia, Bulgaria, pp. 1-4, ISBN: 978-153865801-7. (Scopus)
7. Иван П. Топалов, Марин Б. Маринов, Весела Ангелова Карлова-Сергиева, Амперометрични газови сензори за мобилен мониторинг на качеството на въздуха, Годишник на Техническия университет – София, Том 69, 2019 г. стр. 231–240.
8. M. B. Marinov, Ivan Topalov, UAVs Based Air Pollutants Monitoring, ELECTRONICS 2019, Bulgaria, pp. 1-4.

SUMMARY

METHODS AND MEANS FOR DESIGNING INTELLIGENT MEASURING SYSTEMS FOR PARAMETER MONITORING AND DATA HARVESTING OF ENVIRONMENTAL INFORMATION

Ivan Pavlov Topalov

The presented thesis focuses on three main activities: research and use of low-cost sensors for environmental measurements; development of advanced algorithms for sensor sensitivity and selectivity and use of wide-area sensor networks to monitor air quality parameters.

This thesis consists of an Introduction, four chapters, a Literature, and Appendix.

In the introduction is described the environmental problem in 21 century and the motivation for the research conducted in the dissertation. The aim of the dissertation thesis and the main tasks for its achievement are formulated in the same chapter.

The first chapter presents: basic terms related to air pollution; European Union Directive related to the issue under consideration. Definitions of the main air pollutants are given; air quality assessment indices are considered. The following are discussed: the specifics of intelligent sensor systems for environmental monitoring and modern technics in their development; basic requirements for these systems are outlined. Methods and technologies for measuring the main air pollutants are presented.

The second chapter deals with the research and realization of sensor networks based on the 1-Wire interface.

In the third chapter are presented developed and realized mobile systems for monitoring of fine particulate matter (PM). Approaches have been considered for calibration and accuracy of low-cost PM sensors.

The fourth chapter includes the developed and implemented systems for air quality monitoring - one fixed and one mobile. The design and implementation of: Mobile Sensor Module; and intelligent sensor system for air quality monitoring.

In the conclusions the achieved results are analyzed and guidelines for future research are outlined.

The ever more complicated and demanding regulations for reducing particulate matter (PM) levels require ever more extensive measurements with improved time and spatial resolution.

The continued development of micro- and nanotechnology as well as wireless communication networks has led to a significant change in the concept of PM monitoring. The latest developments in sensor technology enabled the introduction of low cost (in the segment 10-20 €) and semi-professional (in the higher price segment of 500-1 000 €) sensors designed for urban environment.

The accuracy of low-cost sensors is still insufficient and the systems created on their basis usually require significant calibration and maintenance.

Research in the dissertation suggests that low-cost monitors can be successfully built to track basic environmental parameters using economical and semi-professional sensors.