



ХИМИКОТЕХНОЛОГИЧЕН И МЕТАЛУРГИЧЕН УНИВЕРСИТЕТ

ФАКУЛТЕТ ПО ХИМИЧНО И СИСТЕМНО ИНЖЕНЕРСТВО

КАТЕДРА „АВТОМАТИЗАЦИЯ НА ПРОИЗВОДСТВОТО“

инж. Васил Методиев Иванов

**ГЕОГРАФСКИ РЗПРЕДЕЛЕНИ СИСТЕМИ ЗА
МОНИТОРИНГ И УПРАВЛЕНИЕ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация

**за придобиване на образователната и научна степен „доктор“
по научна специалност 5.2. Електротехника, електроника и автоматика
(Автоматизирани системи за обработка на информацията и управление)**

Научен ръководител: доц. д-р инж. Георги Димитров Еленков

Научно жури:

1. проф. д-р инж. Идилия Александрова Бачкова - председател, рецензент
2. проф. д.т.н. инж. Красимира Петрова Стоилова - рецензент
3. проф. д-р инж. Милена Кирилова Лазарова - Мицева
4. проф. д-р инж. Гриша Валентинов Спасов
5. доц. д-р инж. Георги Димитров Еленков

София, 2020

Дисертационният труд е написан на 189 страници, съдържа 116 фигури, 40 таблици и 9 приложения. Цитирани са 119 източника.

Представеният дисертационен труд е обсъден и приет за защита на заседание на разширен научен съвет на научното звено на катедра „Автоматизация на производството”, състояло се на 21.02.2020г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се проведе на 18.05.2020 г. от 11:30 часа в зала³⁰¹....., сграда „А” на ХТМУ.

Материалите са на разположение на интересующите се на интернет страницата на ХТМУ и в отдел „Научни дейности”, стая 406, етаж 4, сграда „А” на ХТМУ.

УВОД

В последните години развитието на технологиите е немислимо да бъде осъществявано без обмяната на информация през глобалните компютърни мрежи. Достъпът до информация, както и възможността за пренос на данни, са ключови фактори при решаването на всеки един научен проблем към днешна дата. Създаването, разработването и изграждането на една хетерогенна географски разпределена компютърна мрежа е свързано с познаване и прилагане както на хардуерните компоненти и стандартните протоколи и модели за комуникация от една страна, така и с необходимостта от изследване на различни мрежови конфигурации, поведението на мрежата по отношение на времезакъснения, както и избор на компоненти с цел минимизиране на разходите. Всичко това е необходимо, тъй както изграждането на система за наблюдение на параметрите на околната среда, на първо място се нуждае от стандартни технически средства за предаване на информацията.

Небезизвестен факт е, че параметрите на околната среда са от съществено значение както за здравето, така и за работоспособността на хората. Под параметри на околната среда се разбират показатели за качеството на въздуха на открито и закрито, показатели за качеството на водите, почвите, изисквания към строителните материали, материали за защитни и декоративни покрития, мебели, храни и др. Доколкото замърсители на почвата и някои други компоненти на околната среда могат да бъдат имобилизирани, то тези на въздуха постъпват директно в човешкия организъм чрез дишането, поради което въздухът се явява компонент на околната среда с най-строго изискване за опазване на неговото качество. Много често влиянието на различни замърсители на въздуха или други параметри на околната среда остава незабелязано, поради което се наблюдава развитието на хронични оплаквания, вариращи от леко неразположение до сериозни заболявания и временна или постоянна загуба на работоспособност.

В световен мащаб са разработени редица стандарти и изисквания за качеството на работната среда, за затворени помещения, обитавани от специфични групи хора (като малки деца, ученици, възрастни хора и др.), които обаче сами по себе си не биха могли да бъдат прилагани без съответните технически средства за наблюдение. Ето защо проектирането и изграждането на сензорни мрежи, както и анализа на данните, постъпващи от тях, представляват научен интерес и са изключително актуални проблеми. Сензорните мрежи дават възможност за включване на допълнителни елементи, превръщайки ги в почти универсално средство за наблюдение на параметрите на околната среда – въздух, води, почви, както в закрити, така и в открити широкообхватни зони. Постъпващите сурови данни от сензорната мрежа могат да бъдат превърнати в полезна информация на едно по-високо йерархично изчислително ниво, след което да бъдат използвани за извличане на знания от данни (data mining), разработване на математични модели или валидиране на съществуващи, както и регистриране и разпознаване на събития.

Целият процес за разпознаване на събития протича на няколко етапа – разбиране на проблемната област, разбиране на данните, подготовка на данните, моделиране, оценка и експлоатация на моделите.

Ето защо настоящият дисертационен труд е посветен на проблема за проектирането, изграждането и конфигурирането на географски разпределени мрежи от сензори и приложението им в автоматизирани системи за обработка на данните, информацията и управление.

Глава 1. КОМПЮТЪРНИ МРЕЖИ И ЕКОЛОГИЧЕН МОНИТОРИНГ

1.1. Компютърни мрежи

Компютърните мрежи са сложни информационни хетерогенни структури от свързани устройства, които могат да изпращат и получават данни, по дефинирани семантично и синтактично правила и стандарти за комуникация. Предаването на данни между две свързани точки в компютърната мрежа се формализира под формата на комуникационни протоколи, които могат да се прилагат със или без процес по стандартизация. Липсата на стандартизация, въпреки наличието на пазарно наложени се *de facto* стандарти (напр. GNU/Linux), води до краткосрочни и дългосрочни негативни последици за развитието на комуникациите между отворени системи.

1.1.1. Физическа структура

Физическата структура на компютърната мрежа от гледна точка на комуникационния процес и неговите приложни аспекти се разделя от своя страна на две подсистеми: комуникационна подсистема и подсистема за потребителски достъп. Комуникационна (транспортна) подсистема е топологичен модел на структурните елементи на компютърната мрежа, реализиращи семантично свободен пренос на информация. Тя състои от комуникационни линии и интерфейсни процесори на съобщенията.

Анализът на физическата структура на мрежата е свързан със следните проблеми и задачи:

- избор на подходяща топология на подсистемата със зададена степен на надеждност;
- оценка на информационните потоци;
- избор на физическа среда за реализация на комуникационните линии;
- оценка на информационното натоварване и избор на архитектура и алгоритмична база реализация на интерфейсните процесори на съобщенията;
- избор на топология на локалната преносна среда;
- разполагане на активното мрежово оборудване;
- разполагане на компютърните системи, осигуряващи колективен достъп до ресурси;
- избор на физическа среда за реализация на локалните комуникационни линии;
- разполагане/свързване на компютърните системи или други комуникационни устройства за крайните потребители.

1.1.2. Функционална структура

Взаимодействието и интеграция на физическата и функционалната структура на компютърната мрежа осигурява за всеки две точки достоверен път за обмен на информация в комуникационната среда. В този смисъл може да се дефинира основната функция на компютърната мрежа - осигуряване на достоверен път за достъп на всяка една крайна точка до всяка една друга крайна точка (потребителски процес).

Реализирането на достоверен път за достъп не е единичен акт, а съвкупност от функции за осъществяване и поддържане на комуникационна връзка. Задачата за осигуряване на достоверен път за достъп предполага дефинирането на система от функции и междофункционални връзки. Те представят същността на функционалната структура на компютърната мрежа.

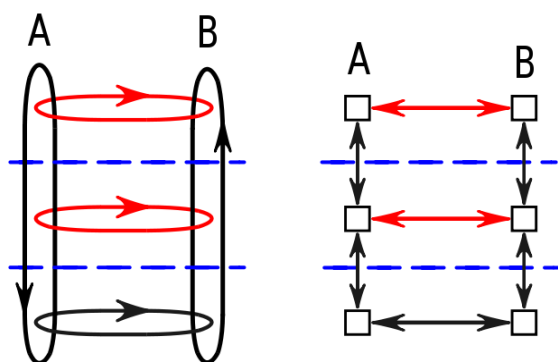
Приложната съвместимост обединява голям брой подфункции, които решават следните групи проблеми:

- съвместимост при представянето на информацията;
- съвместимост от гледна точка на използваните приложни програми;
- съвместимост при достъпа до ресурсите за колективно използване;
- съвместимост по отношение на мерките за защита на информацията.

Необходимостта от обединяване на разнородни устройства в сложни хетерогенни мрежи води до необходимостта от разработване на концепция и установяване универсални правила на взаимодействие между възлите в разпределената изчислителна среда. Развитието на общовалидни мрежови стандарти и разпространението им позволява съвместяването на мрежови архитектури, изградени по различни, в някои случаи значително отличаващи се по структура модели.

1.1.3. Стандартизация на технологиите в компютърните мрежи

Стандартизацията е сложен и продължителен във времето процес, който се



Фигура 1 – Функционално разслояване на комуникациите между две отдалечени свързани системи А и В

реализира от работни групи на определена стандартизираща организация (International Organization for Standardization, ISO; International Telecommunication Union, ITU; Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE; World Wide Web Consortium, W3C и др.), които предлагат проект за международен стандарт. При прилагането на проекта за стандарт неизбежно се откриват различни несъответствия и неясноти, които след обсъждане, модифициране, съгласуване със заинтересованите страни проекта може да се превърне в

международен стандарт. Протичащите процеси са описани и приети като най-добри налични практики с документ RFC2026 “The Internet Standard Process – Revision 3” на IETF, дефиниращ стъпките в процеса по стандартизация, изискванията за преминаване през различните стъпки, типовете документи, изисквани за това, както и проблемите, свързани с интелектуалната собственост и авторски права.

Различните класификации на мрежовите комуникационни протоколи обичайно се фокусират върху областта на приложение или върху изпълняваните функции. Използването на разслояване, или поднива при описанието им, позволява да се комбинират областта на приложение с функционалните характеристики.

За да се формализират областите и функциите на отделните слоеве могат да бъдат приложени различни модели на комуникацията.

Таблица 1 – Модели на мрежова комуникация

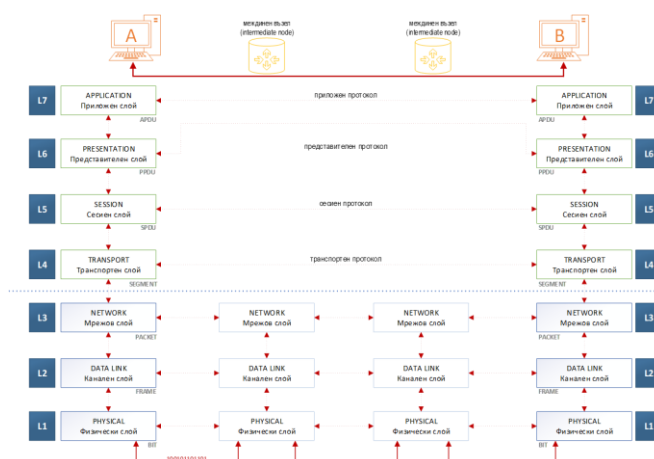
Източник	RFC 1122, Internet STD 3 (1989)	Cisco академия	Kurose, Forouzan	Comer, Kozierok	Stallings	Tanenbaum	Arpanet референтен модел (RFC 871)	OSI модел
Наименование	„Internet model“	„Internet model“	„Five-layer Internet model“ или „TCP/IP protocol suite“	„TCP/IP 5-layer reference model“	„TCP/IP model“	„TCP/IP 5-layer reference model“	„Arpanet reference model“	„OSI model“
Брой слоеве	4	4	5	4+1	5	5	3	7
Наименование на слоя	Application Приложен	Application Приложен	Application Приложен	Application Приложен	Application Приложен	Application Приложен	Application/Process Приложен/Процес	Application Приложен
	Transport Транспортен	Transport Транспортен	Transport Транспортен	Transport Транспортен	Host-to-host/ transport Хост-до-хост/ транспортен	Transport Транспортен	Host-to-host Хост-до-хост	Presentation Представителен
	Internet Интернет	Internetwork	Network Мрежов	Internet Интернет	Internet Интернет	Internet Интернет		Session Сесия
	Link Свързващ	Network interface Мрежов интерфейс	Data link Канален	Data link (Network interface) Канален (Мрежов интерфейс)	Network access	Data link Канален	Network interface Мрежов интерфейс	Transport Транспортен
			Physical Физически	Hardware Хардуер	Physical Физически	Physical Физически		Network Мрежов
								Data link Канален
								Physical Физически

В Таблица 1 са представени описаните в литературата модели за мрежова комуникация.

1.1.4. Open System Interconnection (OSI/RM) модел

Еталонният модел за взаимодействие между отворени системи (Open System Interconnection Reference Model, OSI/RM) е еквивалентна форма на описание на компютърна мрежа като архитектура на няколко нива, проявяващи се в процеса на взаимодействие. Моделът се основава на три основни понятия:

- отворени системи, съответстващи на основните градивни елементи на мрежите от компютри;
- приложни процеси, характеризиращи потребителския достъп до информационните ресурси на мрежите от компютри;
- съединения, осигуряващи обмяна между приложните процеси в архитектурния модел.



Фигура 2 – Връзка между две системи, описана с Open System Interconnection референтен модел

Компютърната мрежа в архитектурен и функционален план е един сложен за декомпозиция обект. Определянето на ясни принципи на декомпозиционния процес, методика и подход за определяне на броя на нивата и запълването на тези нива с функционалност е базата на проведения от работната група на ISO анализ и последващите стандарти. За да се детайлизират методите и средствата при формирането на нивата, да се разграничат ясно определените функции и да се улесни приложението и разпространението на модела е важно да се съблюдават следните принципи на архитектурен анализ:

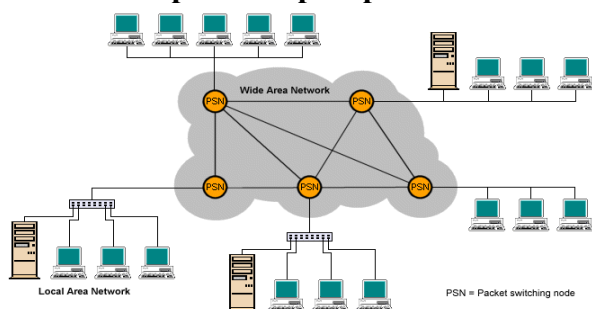
- за всяко ниво на абстракция съществува слой в еталонния модел, т.е. всяко от нивата има реален обект за приложение;

- всеки слой от модела изпълнява една и само една точно определена функция, т.е. модела е структуриран без функционално припокриване, което улеснява провежданите анализи;
- информационния поток между отделните слоеве на модела трябва да е минимален (минимизиране по сложност на междуслоестите интерфейси) за сметка на протоколите на всяко от нивата;
- броят слоеве в модела трябва да бъде достатъчно малък за избягване на излишната сложност, но достатъчно голям за да удовлетвори изискването всяка функция да има слой, т.е. задаване на определена граница на декомпозицията на слоевете;
- действието на всеки слой трябва да бъде приемливо за стандарта и в същото време да удовлетворява и реалностите на действащите мрежови архитектури, т.е. моделът да се базира на опита в стандартизационната практика в областта на мрежите от компютри.

На базата на принципите при създаване на Еталонния модел и стандартът ISO/IEC 7498 се дефинира броя на слоевете и функционалната им обособеност. Свързването на протоколи от различни слоеве става с помощта на предварително дефинирани интерфейси, като всеки по-долен слой ограничава и определя възможностите за предаване на информация на по-горните. По време на този процес протоколите от всеки слой си разменят специфично форматиранни данни, наречени PDU (Protocol Data Unit).

Предаването на информацията използва концепцията на осъществяване на пренос на дискретни единици форматирана информация (дейтаграми) – datagram packet switching и свързването на виртуални вериги – virtual circuit switching, с определяне по определен алгоритъм или методика на оптималния път между източника и получателя на данните при налични множество възможни пътища. Комбинираната работа на мрежови протоколи на различните функционални нива при пакетното предаване (packet switching, напр. по стандарт ITU X.25/96) позволява различен път на отделните дейтаграми през междинните мрежови възли. Мрежовите възли могат да използват различни физически преносни среди и различни протоколи за комуникация. Реконструирането на данните се извършва в получаващия хост с използване на подходящите .

1.1.5. Хетерогенни разпределени компютърни мрежи



Фигура 3 – Пакетно предаване на данни

Комутацията на пакети позволява свързването на хетерогенни компютърни мрежи една с друга и изграждането на сложни логически и географски разпределени системи с конкретно предназначение и задачи.

Тези задачи могат да включват:

- пренос на данни с общо предназначение (осигуряване на Интернет връзка на крайни потребители);
- хетерогенни компютърни мрежи за целите на обучението;
- изграждане на разпределени системи за събиране на информация от технологични процеси;
- сензорни мрежи, като част от киберфизически системи;
- изграждане на разпределени системи за събиране на информация за метеорологични параметри;
- изграждане на разпределени системи за събиране на данни за екологичен мониторинг.

1.2. Основни замърсители на въздуха

Атмосферата се състои основно от азот, кислород, инертни газове и въглероден диоксид. Освен тях, в различен момент и в различни слоеве в атмосферата присъстват т.нар. примеси, които могат да бъдат замърсители с вредно влияние върху човешкото здраве или безвредни примеси (напр. водната пара). Нормите за съдържание на замърсителите в атмосферния въздух се обновяват непрекъснато. Към настоящия момент, броят на веществата - замърсители на въздуха, чието съдържание е обект на наблюдение и контрол е значителен – над 170. Особено внимание заслужават и праховите замърсители, най-вече фините прахови частици, които се характеризират с аеродинамичен диаметър до 10, 2.5 и 1 μm . Основните замърсители не само се емитират в сравнително големи количества, но някои от тях, попаднали веднъж в атмосферата, представляват прекурсори за получаването на други замърсители.

1.2.1. Фини прахови частици (ФПЧ)

Прахът е основен замърсител на въздуха. Вредния му здравен ефект зависи главно от размера и химичния състав на суспендираните прахови частици, от адсорбираните на повърхността им други химични съединения, в това число мутагени, ДНК-модулатори и др., както от участието на респираторната система, в която те се отлагат. Атмосферните прахови частици се дефинират като всяко разпръснато вещество, твърдо или течено, в което индивидуалните агрегати са по-големи от отделните малки молекули (с диаметър около 0.0002 μm), но са по-малки от около 500 μm . Въпреки че частиците могат да имат много неправилни форми, техният размер може да бъде описан посредством еквивалентен аеродинамичен диаметър, установен чрез сравняването им с идеални форми, имащи същата скорост на утаяване. Праховите частици от най-голям интерес имат аеродинамичен диаметър в интервала от 0.1 до 10 μm . Прахови частици по-малки от тези биват подложени на хаотично (Брауново) движение и, посредством коагулация, нарастват до размери по-големи от 0.1 μm . Частици по-големи от 10 μm се утаяват доста бързо. Частица с размер 10 μm , например, има скорост на утаяване приблизително 20 cm/min.

ФПЧ_{2.5} (Particulate Matter, PM_{2.5}) отговаря на частици с диаметър 2.5 μm или по-малко. ФПЧ₁₀ (PM₁₀) отговаря на частици с диаметър 10 μm или по-малко. ФПЧ₁₀ включва и фракцията груби частици в допълнение към фракция ФПЧ_{2.5}. Праховите частици са или първични, защото частиците постъпват в атмосферата директно (напр. от комин), или формираны в атмосферата от окисление и трансформация на първични газови емисии. Последните се наричат вторични частици. Най-важните прекурсори (газови замърсители, допринасящи за образуването на частици) за вторични частици са SO₂, NO_x, NH₃ и летливи органични съединения (ЛОС).

Неорганични прахови частици

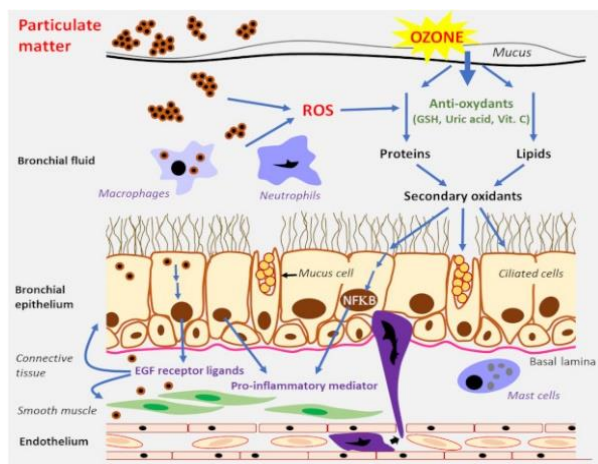
В Европа около една трета от концентрацията на ФПЧ₁₀ и една втора от концентрацията на ФПЧ_{2.5} в регионалния фон се състои от неорганични химични вещества, като амониев катион (NH₄⁺), нитратен анион (NO₃⁻) и сулфатен анион (SO₄²⁻). Тези вещества са резултат от химични реакции в атмосферата, включващи прекурсорните газове: NH₃, NO_x и SO_x.

Органични прахови частици

Органичните вещества допринасят средно с около 30 % към концентрацията на ФПЧ_{2.5} и с 20 % към тази на ФПЧ₁₀ в Европейския регионален фон. Органичните прахови частици се състоят от стотици отделни химични вещества. Някои от органичните вещества са полуетливи така че те могат да присъстват както като газове, така и като кондензиран материал в праховите частици. Тяхното присъствие усложнява процеса на пробовземане. Следователно е трудно да се получи пълна химическа информация за органичните

вещества. Емисиите, които не са от отработени газове се оценяват на около 50 % от емисиите на отработени газове на първични ФПЧ₁₀ и на около 22% от емисиите на отработени газове на ФПЧ_{2.5}. Емисиите от износване на гуми, спирачки и пътна настилка се равняват приблизително на 60% от емисиите на отработени газове на ФПЧ₁₀ и около 30% от емисиите на отработени газове на ФПЧ_{2.5} в Европейския съюз (ЕС). ФПЧ_{2.5} се смята за по-добър индикатор за прахови частици, образувани в следствие на антропогенни дейности отколкото ФПЧ₁₀.

Въздействие на ФПЧ върху човешкото здраве и околната среда



Фигура 4 – Механизъм на възникване на свободни радикали в дихателната система под въздействие на ФПЧ и озон в атмосферния въздух

частици и, в по-малка степен, на озона. Дори при концентрации под настоящите насоки за качество на атмосферния въздух се очаква праховите частици да представляват риск за здравето. Научните доказателства не предполагат праг, под който не се очакват неблагоприятни последици за здравето при излагане на прахови частици.

На Фигура 4 е показан механизмът на възникване на свободни радикали (Reactive Oxygen Species, ROS) – като O_2^- , H_2O_2 и OH^- , които са ключови фактори за адаптивния отговор или токсични събития (възпалителния отговор, окислителния стрес), индуцирани от фините и ултрафини прахови частици. Смъртността, причинена от прахови частици, ясно се свързва с фракция ФПЧ_{2.5}, която в Европа представлява 40-80% от масовата концентрация на ФПЧ₁₀ в атмосферния въздух, но по-грубата фракция на ФПЧ₁₀ (между 2.5 и 10 μm) също оказва влияние върху здравето. Въпреки наличието на данни, че ФПЧ_{2.5} е може би по-голям проблем за здравето, често са налични и се използват измервания на качеството на атмосферния въздух (КАВ) и данни за емисиите само за ФПЧ₁₀. В ЕС средната продължителност на живота се оценява на 8.6 месеца по-малка поради експозиция на ФПЧ_{2.5} в резултат на човешки дейности.

Нормативна база

Качеството на атмосферния въздух в Република България се регламентира по силата на редица нормативни актове, по-важни от които са:

- Закон за чистотата на атмосферния въздух /Обн. ДВ. бр.45 от 28 май 1996г., посл. изм. и доп. ДВ. бр.12 от 3 февруари 2017г./
- НАРЕДБА № 7 от 3.05.1999 г. за оценка и управление качеството на атмосферния въздух /Обн., ДВ, бр. 45 от 14.05.1999 г., в сила от 1.01.2000 г./

- НАРЕДБА № 11 от 14 Май 2007 г. за норми за арсен, кадмий, живак, никел и полициклични ароматни въглеводороди в атмосферния въздух /Обн. ДВ. бр.42 от 29 Май 2007г./
- НАРЕДБА № 12 от 15 Юли 2010 г. за норми за серен диоксид, азотен диоксид, фини прахови частици, олово, бензен, въглероден оксид и озон в атмосферния въздух /Обн. ДВ. бр.58 от 30 Юли 2010г., в сила от 30.07.2010 г./ С тази наредба са регламентирани нормите за фини прахови частици. Те целят предпазване от вредния им ефект върху здравето на хората и околната среда. Нормите за фини прахови частици са следните:
- ФПЧ₁₀ - средноденоношна норма (СДН) - 50 µg/m³ (да не бъде превишавана повече от 35 пъти годишно); средногодишна норма (СГН) - 40 µg/m³;
- ФПЧ_{2.5} – средногодишна норма 20 µg/m³, в сила от 1 януари 2020г.;
- НАРЕДБА № 14 от 23.09.1997 г. за норми за пределно допустимите концентрации на вредни вещества в атмосферния въздух на населените места /Обн., ДВ, бр. 88 от 3.10.1997 г., изм., бр. 46 от 18.05.1999 г., в сила от 1.01.2000 г., бр. 8 от 22.01.2002 г., в сила от 1.01.2002 г., бр. 14 от 20.02.2004 г., в сила от 1.01.2004 г., бр. 42 от 29.05.2007 г., в сила от 1.01.2008 г./ С тази наредба са приети норми за пределно допустими концентрации (ПДК) на вредни вещества в атмосферния въздух на населените места. Регламентирани са следните пределно допустими концентрации (ПДК) на общ суспендиран прах: еднократна ПДК - 0.5 mg/m³; средно максимално денонощна ПДК (за 24 часа) - 0.25 mg/m³; средногодишна ПДК (за една календарна година) - 0.15 mg/m³;

1.2.2. Общи летливи органични съединения

Съществуват различни класификации за Летливи Органични Съединения (ЛОС, от англ. VOC – Volatile Organic Compounds). Най-често използваната дефиниция е тази на Световната здравна организация, която диференцира летливостта (или точката на кипене) на органичните съставки за разделяне на Лесно летливи органични съединения (VVOC – Very Volatile Organic Compounds), летливи органични съединения (VOC – Volatile Organic Compounds) и полу-летливи органични съединения (SVOC – Semi Volatile Organic Compound). Сумата на всички летливи органични съединения се нарича Общи Летливи Органични Съединения (ОЛОС, от англ. TVOC – Total Volatile Organic Compounds). Обемът на газовете от определен клас и сборът от всички газове (TVOC) са важни отражения на съответните органични съединения, откривани във въздуха на закрито. Според стандарт ISO16000-6 това са летливи органични съединения с точка на кипене от 50 до 260 °C и парно налягане на наситените пари над 100kPa при 25 °C ISO 11890-2:2013 дефинира ЛОС като органични течни или твърди съединения, които се изпаряват спонтанно при температура и налягане на околната среда. Друга класификация определя наличието на летливи органични съединения с микробен произход (Microbial Volatile Organic Compounds, MVOC), като резултат от метаболитните процеси на плесени, гъби и бактерии.

TVOC като индикатор за качеството на въздуха в закрити помещения

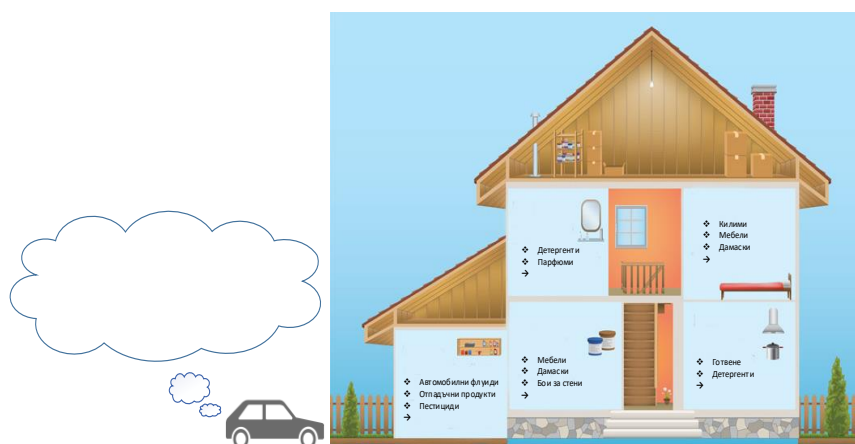
На Фигура 5 са показани някои от причините за безпокойство относно възможни отрицателни въздействия на TVOC в сградите. TVOC се счита за важен индикатор за хигиената на закрито и качеството на въздуха в закрити помещения

ЛИЧЕН КОМФОРТ	УСЕЩАНЕ ЗА ЧИСТОТА	ЗДРАВЕ
Повишените нива на TVOC могат да предизвикат главоболие и дразнене	Лошите миризми и застоялият въздух могат да се възприемат като липса на чистота и това да накара хората да се чувстват некомфортно	Някои TVOC са канцерогени (напр. формалдехид)
Някои хора, особено децата, имат по-голяма чувствителност	Хората могат да загубят способността да възприемат аромати (загуба на обоняние), ако често са изложени на миризми от ЛОС	Някои TVOC са дразнителни (напр. толуен)

Фигура 5 – Качество на въздуха в затворени помещения

Често срещани летливи органични съединения в закрити пространства и техните източници

Летливите органични съединения са широко разпространени както на открито, така и на закрито. В зависимост от интериорната декорация и употреба, една стая може да бъде замърсена с различни органични съединения в същото време. На Фигура 6 са показани



Фигура 6 – Типични източници на TVOC вътре в дома

типичните източници на летливи органични съединения в дома.

Последици от излагане на въздействието на TVOC

Има значителни опасности за здравето, свързани с излагането на замърсители на вътрешния въздух в жилищни и офис пространства. Агенцията по околна среда на САЩ оценява, че лошото качество на въздуха в закрити помещения засяга

33% до 50% от търговските сгради в САЩ и носи отговорност за над 125 000 000 изгубени училищни дни и 10 000 000 изгубени работни дни всяка година. Като се има предвид времето, което повечето хора прекарват на закрито, експозициите на ЛОС в затворени помещения са от 10 до 50 пъти по-големи от експозициите в открити пространства.

Граници на опасните състояния и стандарти за TVOC

Има няколко източника на препоръки по отношение на нивата на TVOC, които са опасни за човешкото здраве. Таблица 2 представя обобщение, което сравнява нивата от различните източници за редица химични вещества. Всички нива се изразяват в милиграми на кубичен метър (mg/m^3), като обичайното време на експозиция е 8 часа дневно, освен когато е споменат различен период. Въпреки че концентрациите варират при различните организации, има общо споразумение да се сведе до минимум концентрацията на TVOC.

Американска агенция по околна среда

Насоките за експозиция на високи нива на ЛОС (Acute Exposure Guideline Levels - AEGLs), предоставени от Агенцията по околна среда на Съединените американски щати, описват ефектите върху човешкото здраве от експозициите на химикали във въздуха. AEGLs, които се използват от звената за извънредни ситуации, когато се занимават с химични разливи или други катастрофални събития, са определени чрез съвместни усилия на публичния и частния сектор.

Комисия за изследване на опасностите за здравето, причинени от химични съединения (Германия)

Максималните концентрации на работната среда (МАК и AGW стойности) се задават от DFG Commission for the Investigation of Health Hazards of Chemical Compounds in the Work Area, която е част от Германската асоциация за научни изследвания (German Research Foundation - DFG).

Световна здравна организация

Световната здравна организация (СЗО) представя насоки за защита на общественото здраве от рискове, дължащи се на редица химикали, които обикновено присъстват във въздуха в затворени помещения.

Таблица 2 - Прагови стойности на TVOC в затворени помещения според различните организации

Химично вещество	ЕРА, САЩ (8 часа дневно)	DFG, Германия (8 часа дневно)	СЗО (време на експозиция)
Бензен	29 mg/m ³	0.2 mg/m ³	няма безопасна концентрация
Формалдехид	1.12 mg/m ³	0.37 mg/m ³	0.1 mg/m ³ (30 min)
Нафтаден	-	0.5 mg/m ³	0.01 mg/m ³ (1 година)
Стирен	86 mg/m ³	86 mg/m ³	0.26 mg/m ³ (1 седмица)
Трихлоретилен	420 mg/m ³	33 mg/m ³	230 mg/m ³ (доживотен риск от 1/10.000)
Тетрахлоретилен	241 mg/m ³	138 mg/m ³	0.25 mg/m ³ (1 година)
Толуен	257 mg/m ³	190 mg/m ³	0.26 mg/m ³ (1 седмица)

Стандарти за качество на въздуха в затворени помещения

Към момента няма глобален стандарт, който да определя качеството на въздуха в закрити помещения. Някои държави имат местни подходи и имат публикувани проучвания, които дават показатели за чистота на атмосферния въздух и тяхното приложение. Те всички дефинират пряка връзка между TVOC и лошо качество на въздуха в затворени помещения.

Според проучване на германската федерална агенция по околна среда, качеството на въздуха в затворени помещения (Indoor Air Quality – IAQ) се определя от концентрацията на 11 газове, от които 8 принадлежат към класификацията на общи летливи органични съединения. Ниво I (GV I) описва концентрациите, под които не се очакват неблагоприятни последици за здравето при експозиция през целия живот на индивида. Стойностите в Ниво II (GV II) могат да представляват заплаха за здравето когато са превишени, особено за чувствителните хора и изискват предприемането на незабавни действия (например ограничаване на времето, прекарано в помещението). Ръководство от групата за управление на качеството на вътрешния въздух на Хонг Конг определя в „A Guide on Indoor Air Quality Certification Scheme for Offices and Public Places“ (Ръководство за схемата за сертифициране на качеството на въздуха в закрити помещения и обществени места) процедурите за участие в сертифицирането на качеството на въздуха в закрити помещения. Тя е публикувана от групата за управление на качеството на въздуха в Хонг Конг и дава насоки за доброволна схема за сертифициране на качеството на въздуха в затворени помещения (за офиси и обществени места, като театри, кина, хотели, молове, хотели и др.) с диференциация на два класа (добро и отлично). Стандартът “WELL Building” е дефиниран за първи път през 2014 г. от Международния институт за сградно строителство (International WELL Building Institute – IWBI), организация с идеална цел. През 2017г. се появява втора допълнена версия. Той насърчава подобряването на здравните аспекти и благосъстоянието на сградите, фокусирайки се върху потребностите на хората работещи в тях, и проблемите свързани с увеличаване на загубите поради незадоволителни условия на труд. IWBI сътрудничи с Green Business Certification Institute (GBCI), често използвана система за оценяване на сградите, и сертифицира LEED (Leadership in Energy and Environmental Design). Целта на сертифицирането по стандарт “WELL Building” е да се повиши осведомеността за нуждите на човешкото здраве и комфорта при планирането и проектирането на сградите и в развитието на най-добрите строителни практики.

За да се идентифицират замърсителите на въздуха, стандартът WELL Building приема националните стандарти за качество на атмосферния въздух (National Ambient Air Quality Standards - NAAQS) от Агенцията по околна среда на САЩ (EPA) и разширява тези изисквания, като приема допълнителни стандарти, като например тези на Световната здравна организация (СЗО) и най-добрите практики от промишлеността, като например тези на American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE).

Класификация на качеството на атмосферния въздух в затворени помещения

TVOC обхваща широк спектър от различни органични газове, които могат да бъдат със сходна химична структура и са трудни за разграничаване. За класификацията на качеството на въздуха и покриване на широк спектър от стандарти и газове са използвани два международно признати методики за TVOC - комбинация от Агенцията за околна среда (EPA) на САЩ и разделът за летливи органични съединения от изследването от Германската федерална агенция по околна среда (UBA). Представителната смес за оценяване на TVOC „EPA TO-15/17 Calibration Mix” на Агенцията за околна среда се състои от 25 отделни летливи органични съединения и отговаря на всички признати методики. Класификацията е показана в Таблица 3. Интегрирането на газови сензори в обитаеми затворени пространства не само предоставя информация за текущото ниво на TVOC, но също така позволява да се определят необходими действия и периода от време, в който да се извършат.

Таблица 3 - Класификация за качеството на въздуха в затворени помещения

Ниво	Описание	Необходимо действие	TVOC mg/m ³	TVOC ppb	Качество на въздуха
Ниво 1	Чист хигиеничен въздух (целева стойност)	Не се изисква действие	< 0.3	< 150	Много добро
Ниво 2	Добро качество на въздуха (няма превишена прагова стойност)	Препоръчителна вентилация	0.3 – 1.0	150 – 500	Добро
Ниво 3	Слабо нарушен комфорт (не се препоръчва експозиция над 12 месеца)	Необходима е вентилация Идентифициране на източниците	1.0 – 3.0	500 – 1500	Средно
Ниво 4	Значими проблеми с комфорта (не се препоръчва експозиция над 1 месец)	Обновяване на въздуха при възможност Увеличаване на вентилацията Идентифициране на източниците	3.0 – 10.0	1500 - 5000	Лошо
Ниво 5	Неприемливи условия (няма безопасно време на експозиция)	Престой в помещението само при крайна необходимост и за кратки периоди от време	> 10.0	> 5000	Много лошо

1.3. Методи за измерване на фини прахови частици в атмосферния въздух

В Таблица 4 са представени методите за измерване на аерозоли във въздуха, като е направено обобщение на основните им предимства и ограничения. Очевидно е наличен широк спектър от техники с различни предимства по отношение на разходите, точността, обхвата на измерване според на размера на частиците и пробонаборните ограничения.

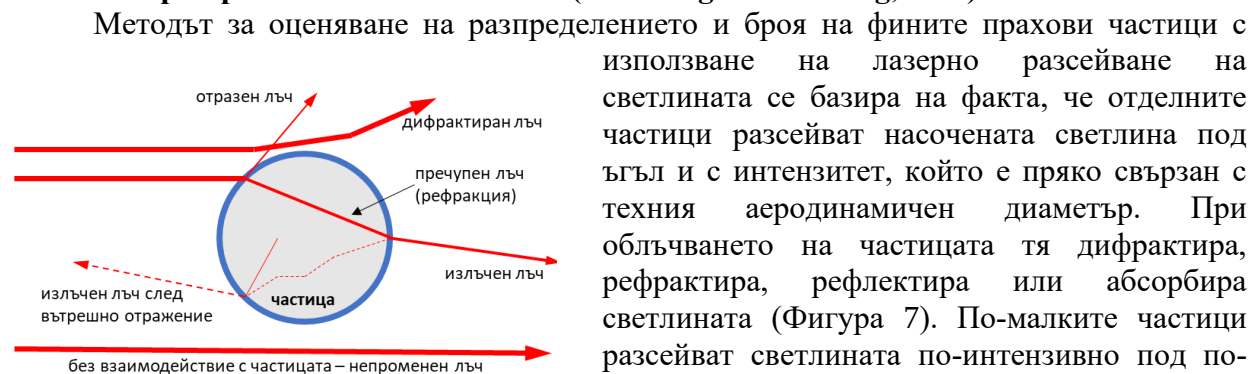
Таблица 4 - Методи и инструменти за измерване на аерозоли във въздуха

Инструмент	Предимства	Ограничения
LLS (Laser Light Scattering)	Измервания в реално време. Преносим и евтин. Може да измерва едновременно различни по големина фракции на частиците.	Влияе се от дрейф на характеристиките. Трябва да се калибрира за различните аерозоли.
FBMS (Filter Based Manual Sampling)	Събраните частици могат да бъдат анализирани химически. Точен и прецизен. Директно измерва масата на ФПЧ.	Дълъг период на пробонабиране (ниска разделителна способност по време). Филтърът изисква внимателно боравене и кондициониране. Измерванията не са в реално време.
BAM (Beta Attenuator Monitor)	Измервания в реално време. Намалена пробоподготовка. Точност, еквивалентна на гравиметричните методи.	Изисква радиоактивни материали. Влияе се от влажността на въздуха, ако входът е без подгряване. Има загуба на полулетливи органични съединения ако се подгрява.
TEOM (Tampered Element Oscillating Microbalance)	Измервания в реално време. Директно измерва масата на ФПЧ. Чувствителен към всички частици.	Високи капиталови разходи. Влияе се от влажността на въздуха, ако входът е без подгряване. Има загуба на полулетливи органични съединения ако се подгрява.
CI (Cascade Impactor)	Възможност за различни конфигурации в зависимост от приложението. Преносим. Могат да се измерват повече от една фракция едновременно.	Ограничен брой на каналите на пробонабор. Изисква вакуумна помпа с дълбок вакуум.
DB (Diffusion Battery)	Измервания в реално време. Възможност за преносимост.	Изисква отделен брояч. Горна граница на размера на частиците около 300 nm.
APS (Aerodynamic Particle Sizer)	Висока ефективност на брояча за твърди частици. Могат да се измерват повече от една фракция едновременно. Използваем при различни условия.	Високи капиталови разходи. Изисква информация за плътността на частиците. Масата се определя индиректно, потенциал за грешка при конвертиране.
SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer)	Точно измерва разпределението на фракциите на наночастиците. Широко използван инструмент.	Може да използва радиоактивни материали. Влияе се от формата на частиците. Високо време за реакция.

В България се използват основно два метода за измерване на фини прахови частици – гравиметричен (който е референтният метод) и метод на бета абсорбция (който се използва в автоматичните измервателни станции АИС за мониторинг на качеството на атмосферния въздух). Освен гореспоменатите официално признати методи за измерване на прахови частици в атмосферния въздух в последно време добива популярност и измерването им чрез сензори, използващи разсейването на лазерно генерирана светлина за броене на праховите частици във въздуха.

Проектът „Luftdaten.info“ използва за сензори оптични броячи на частици (Optical Particle Sizer sensors) като Novafitnes SDS011 и сензори за температура, влажност и атмосферно налягане като Bosh BME 280. Сензорът брой частици в определен обем въздух. Чрез изчислителен модел броят частици се преобразува в $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ФПЧ₁₀ и ФПЧ_{2.5}. Проведени са редица експерименти за доказване на ефективността и надеждността на сензори подобни на използваните в Германия. Резултатите от измерванията със сензори зависят до голяма степен от условията на околната среда и характеристиките на частиците, а също и от местоположението на сензора. Понастоящем сензорите са неподходящи за индикативен мониторинг в Европейския съюз, тъй като не могат да постигнат целите за качество на данните, заложи в директивата 2008/50/ЕО. Въпреки възможните големи грешки при превръщането на броя частици в масова концентрация, използването им за регистриране на концентрацията на прахови частици във въздуха представлява интерес. Резултатите от тяхното приложение показват, че сензорите предоставят груба информация за КАВ, но могат да го категоризират като добро, средно или лошо. В България проектът „Luftdaten.info“ започва през 2016 г. с разполагането на първите частни станции в София. Броят на инсталираните станции непрекъснато нараства, като данните са достъпни през безплатни онлайн услуги (luftdaten.info, airsofia.info и др.).

1.3.1. Лазерно разсейване на светлина (Laser Light Scattering, LLS)



Фигура 7 – Взаимодействие на светлината с частицата при LLS метода

Методът за оценяване на разпределението и броя на фините прахови частици с използване на лазерно разсейване на светлината се базира на факта, че отделните частици разсейват насочената светлина под ъгъл и с интензитет, който е пряко свързан с техния аеродинамичен диаметър. При облъчването на частицата тя дифрактира, рефрактира, рефлектира или абсорбира светлината (Фигура 7). По-малките частици разсейват светлината по-интензивно под по-малки ъгли, отколкото по-големите частици. Аерозолната проба генерира разсеяна светлина, като ъглите и/или промяната на интензитета се регистрират от чувствителен

елемент и се анализират.

1.3.2. Ръчен пробонабор върху филтри (Filter Based Manual Sampling, FBMS)

FBMS методът използва изпомпване на аерозолен поток през филтри, разположени в специализирани устройства (пробонаборни глави), с цел събиране и натрупване на фините прахови частици с определен размер върху стандартен филтър. Концентрацията на ФПЧ може да се изчисли чрез разделяне на масата на събраните частици на обема въздух (използва се калибриран дебит), преминал през филтъра за времето на пробонабор. Допълнителен анализ може да се извърши с пробите за определяне на химичния състав на събраните ФПЧ.

1.3.3. Бета абсорбция (Beta Attenuation Monitor, BAM)

При монитори с абсорбция, β -частиците от радиоизотопен източник преминават тънък филм, върху който се събират фини прахови частици. Чрез измерване на броя на преминаващите електрони може да се определи масата на фините прахови частици върху филма. Потокът на електроните през тънко равномерен слой се изразява като:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x} \quad (\text{I.1})$$

Където I_0 е началния поток електрони, μ е коефициент на масова абсорбция (cm^2/g) и x е дебелината на филма (g/cm^2). Както се вижда от уравнението, увеличаването на дебелината на слоя x от натрупани фини прахови частици директно води до по-малко

електрони, преминаващи през филм. Стойностите на I_0 и μ обичайно се определят след измерване на I като функция на x за няколко известни стандарта. Този метод е с предимство пред директното претегляне на пробите с ФПЧ поради минимизиране на работата с крехките филтърни проби, значително редуциране на рискът от замърсяване на пробите при обработка и възможността за автоматизирана обработка на много проби.

Докато солите от океани и морета, влизащи в състава на фините прахови частици във въздуха, могат да бъдат определени чрез последващ химичен анализ след пробонабор върху филтър (FBMS метод), останалите частици трудно се идентифицират по вид и химична структура, още по-малко това е възможно да се случи в реално време. Тук се очертават два проблема. От една страна различните по състав и произход частици влияят в различна степен на човешкото здраве, но имат едни същи норми за съдържание във въздуха. От друга страна нуждата от тяхното разграничаване е ясно изразена, тъй като мерки по отношение на качеството на въздуха могат да бъдат прилагани единствено по отношение на антропогенните източници.

Учените в цял свят нямат единно мнение за това в каква степен фините прахови частици допринасят за увеличаване на риска от заболяване и смърт, както за времето на експозиция, така и за концентрацията на частиците във въздуха. Друг проблем е, че частиците не са с еднакъв състав и плътност, имат различен произход и тези параметри варират във времето и пространството. От друга страна те са изключително важни, тъй като влияят не само на методите на измерване, а според произхода и състава си имат различно влияние върху човешкото здраве и околната среда. От гореизложеното произтича и една от основните задачи на дисертационния труд, а именно **откриването на подходящ бърз и сравнително евтин за реализация метод за определяне в реално време на източника на моментната концентрация на фини прахови частици.**

Това би могло да се осъществи посредством използването на мобилна модулна автономна сензорна станция, предаваща данни в реално време, и последващ корелационен анализ на данните от нея.

1.4. Мониторинг на качеството на въздуха

Вземането на каквото и да е управленско решение предполага наличието на надеждна и достатъчна по обем информация за състоянието на управлявания обект или система, за настъпилите изменения в това състояние, както и за изменението на факторите, които го обуславят. Ето защо действията за съхранение и подобряване на качеството на атмосферния въздух могат да бъдат базирани единствено на изучаването на моментното състояние, изменението му в исторически план, установяването на причините за протеклите и протичащите процеси и накрая - избор и планомерна реализация на подходяща стратегия за управление.

Процесът на събиране, обработка, съхранение и използване на информация за състоянието на атмосферния въздух и на околната среда като цяло е предмет на екологичния мониторинг. Ето защо, той представлява първата и една от най-важните предпоставки за успешното решаване на какъвто и да е екологичен проблем, независимо от характера и мащаба му.

Понятието *monitoring* от английски език означава следене, наблюдаване, контрол. В съвременния му смисъл обаче, мониторингът представлява дейност, свързана с наблюдение, регистриране, съхранение и използване на данни, които характеризират състоянието на определени обекти или системи. Натрупаните, за определен период от време, данни се използват не само за оценка на моментното състояние на наблюдаваните обекти и системи, но и за анализ на взаимните връзки между различни фактори и

показатели, анализ на причинно-следствените връзки, тенденциите на изменение, както и за прогнозиране на бъдещи състояния. Информацията за състоянието на атмосферния въздух включва преди всичко стойности на концентрациите на замърсители в точките на измерване. Наред с това обаче, се събират, натрупват и обработват и данни за факторите, които го обуславят, т.е. данни относно: метеорологични условия, производствени предприятия, емитиращи замърсители, интензивност и организация на транспорта, необходими и действителни разходи на енергия и др.

Текущото състояние на атмосферния въздух се оценява по концентрациите на различните замърсители в него. Макар в много станции за мониторинг да се практикува непрекъснато измерване на концентрацията на определени замърсители, към системите за мониторинг и управление на качеството на атмосферния въздух трябва да се подават стойности, които съответстват на нормативно установените периоди на експозиция за съответните замърсители. Така например, за ФПЧ10 са установени норми за средноденонощна и средногодишна, а за азотни оксиди – средночасова и средногодишна концентрация за опазване на човешкото здраве. При отсъствие на възможности за осигуряване на непрекъснати измервания, периодичните трябва да бъдат равномерно разпределени във времето, а броят им да осигурява изискуемата степен на статистическа представителност на извадката.

Данните за текущото състояние на въздуха могат да се събират с използването на **стационарни и мобилни станции**. Тъй като изграждането на една стационарна станция изисква определени капиталовложения, изборът на нейното местоположение следва да се направи след обстоен и възможно най-прецизен анализ на преобладаващите в областта метеорологични и климатични условия, релефа на земната повърхност, степента на урбанизация на отделните нейни части и т.н.

От друга страна – разработката на техническо решение за евтина мобилна модулна лесно преносима станция за мониторинг с автономно захранване би позволило изследването на проблеми и намирането на решения във връзката с инвентаризацията на замърсители от обекти с национално значение.

1.5. Математично моделиране и компютърно симулиране на разпространение на замърсителите

Един от широко използваните похвати за оценка на качеството на въздуха, включително и за предсказването му, е математичното моделиране и компютърно симулиране на разпространението на замърсителите. Повечето от математичните модели, реализирани в компютърни пакети, използват под някаква форма данни за количеството на емитирания замърсител и начинът му на емитиране, като всеки от моделите тази емисия се описва по различен начин. Общото при всички, е че колкото по-подробна и детайлна е информацията за емисията и как тя се изменя (варира) във времето за мястото на генериране, толкова по-точно моделирацията може да дефинира източника на емисията и резултатите от това моделиране да бъдат с минимална грешка. Много от най-разпространените пакети, от друга страна, изискват почасови данни за метеорологични параметри, които са ключови за качеството на конкретното изследване. Ето защо е изключително важно едновременно с определянето на вариационните коефициенти за емисия това да бъде извършено с измерването на метеорологични параметри в същата точка. Поради тази причина е необходимо в такава мобилна модулна станция да бъдат включени и метеорологични сензори, записващи в реално време синхронизирано с измерването на останалите замърсители метеопараметри – температура на въздуха, относителна влажност на въздуха, абсолютно атмосферно налягане, точка на оросяване, количество слънчева радиация, достигаща до повърхността, скорост и посока на вятъра.

За определянето на количеството на замърсителя, който се ражда от определена човешка дейност, се използват няколко методики, базирани най-често на емисионни фактори. Емисионните фактори представляват най-често регресионно изведени коефициенти. Докато за точковите източници (технологични комини, вентилационни тръби и т.н.), за източниците от транспорт тези фактори са сравнително постоянна величина и добре анализирани в много проучвания, за площни източници на емисии на фини прахови частици в повечето случаи отсъстват или са налични груби апроксимации, изведени по няколко наблюдения, най-често в твърде различни условия. Такъв е примерът с емисията на частици, емитирани във въздуха, в резултат на вятърна ерозия на депа за съхранение на отпадъци, открити площи, хвостохранилища и табани. Ясно е, че в зависимост от съхранявания или депониран материал, частиците които се отнасят от вятъра във въздуха ще имат различно вредно въздействие върху човешкото здраве и околната среда, като в някои случаи то може да бъде и силно токсично.

Изключително важно е тази емисия да може да бъде определяна с висока точност в зависимост от скоростта на вятъра и за конкретен обект. На територията на България се намират редица такива депа, хвостохранилища, табани, които представляват източници на емисии на частици, много често с високо съдържание на тежки метали като арсен, кадмий, никел, кобалт и др. За целите на националната инвентаризация все повече назрява нуждата от точно изведени емисионни фактори, както и вариационни коефициенти за описание на характера на емисията. В рамките на този дисертационен труд **е предвидено проектиране, изграждане и тестване в реални условия на мобилна модулна станция с автономно соларно захранване, която би могла да бъде използвана като основен инструмент за решаване на задачата за определянето на емисиите и вариационните коефициенти на фини прахови частици от площни източници в реалновременна географски разпределена мрежова структура.** Изграждането на такава система би дало възможност за едновременно наблюдение на генерирането на фини прахови частици от различни площни източници с различна геометрия и състав и за определянето на приносите им към замърсяването с тежки метали и други токсични съединения на въздуха в населените места и особено в чувствителните зони, по важни от които са местата с голяма вероятност за струпване на множество хора (детски градини, училища, университети, болнични заведения, културни и рекреационни обекти и др.).

1.6. Цел и задачи на дисертационния труд

Целта на дисертационния труд е да се проектира, изгради и анализира географски разпределена система от комуникационно свързани устройства с приложение на стандартни мрежови протоколи и модели, с възможност за присъединяване на модулни сензорни мониторингови станции за наблюдение на параметрите на околната среда.

Обектите на дисертационния труд са стандартни разпределени хетерогенни компютърни мрежи, както и модулни реконфигурируеми сензорни станции за мониторинг на параметрите на околната среда.

За целта са поставени следните *задачи*:

1. Проектиране и изграждане на географски разпределена хетерогенна компютърна мрежа за пренос на данни от общ характер. За изпълнението на задачата е необходимо да се:
 - проучи и анализира необходимостта от осигуряване на Интернет свързаност в района на гр. Септември (Пазарджик) и броят на потенциалните потребители на услугата;
 - проучи и анализира техническата възможност за изграждане на безжичен пренос на мрежови данни по стандартни комуникационни протоколи от гр. София до гр. Септември и да се проектира и изгради комуникационното трасе;

- направи избор на компоненти, съобразно икономическите изисквания на инвеститора;
 - проекти и изгради лабораторен експериментален стенд с аналогични хардуерни и софтуерни компоненти за изследване на мрежови конфигурации и времезакъснения;
 - анализира възможността за синтез на робастни регулатори за Интернет базирано управление;
 - проектира и изгради SNMP-базирана модулна разпределена система за наблюдение в реално време на времезакъсненията и параметрите на захранването до точки в населените места от компютърната мрежа.
2. Проектиране и изграждане на разпределена система за мониторинг на условията на жизнената среда в затворени помещения. За изпълнението на задачата е необходимо да се извърши следното:
- проучване и анализ на факторите на жизнената среда в затворени помещения и съответните нормативни изисквания;
 - проучване и анализ на методите и стандарти за оценка на качеството на вътрешната околна среда и комфорта в жилищни сгради;
 - проектиране и изграждане на разпределена модулна система за локален и централизиран мониторинг на параметрите на околната среда в затворени обитаеми помещения;
 - създаване на програмна система, осигуряваща събирането и предаването на данните в реално време от модулните станции за наблюдение до централизираната точка за събиране, обработка и статистически анализ на данните.
3. Проектиране и изграждане на мобилна модулна станция с автономно соларно захранване за измерване на метеорологични параметри и замърсители на въздуха. За изпълнението на задачата е необходимо да се извърши следното:
- проучване на възможните приложения на мобилна модулна станция за мониторинг на параметрите на околната среда в отворени пространства;
 - проучване на изискванията на съвременните компютърни системи за моделиране на разпространението на замърсителите в околната среда относно необходимите входни данни;
 - проектиране и разработка на хардуер и програмно осигуряване на модулна мобилна станция за мониторинг с автономно захранване на параметрите на околната среда;
 - експериментална проверка на приложимостта на разработената станция и възможностите и за откриване и регистриране на събития с цел идентификация на произхода на замърсяването.

2. ПРОЕКТИРАНЕ И ИЗГРАЖДАНЕ НА ГЕОГРАФСКИ РАЗПРЕДЕЛЕНА КОМПЮТЪРНА МРЕЖА ЗА ДОСТАВКА НА КОМУНИКАЦИОННИ УСЛУГИ

2.1. Обосновка на необходимостта от изграждане на комуникационна мрежа

До 2000 година на територията на България са реализирани различни по сложност и технологични решения за хетерогенни компютърни мрежи за доставка на Интернет услуги и мрежова свързаност. Най-добро покритие и качество на услугите съществува в големите областни градове. В района западно от град Пазарджик към началото на 2004 година единствената възможност за връзка на крайни и корпоративни клиенти към Интернет се осигурява от БТК (понастоящем Виваком) и много малки сегментирани доставчици на Интернет свързаност, предлагащи бавни, скъпи и нискокачествени връзки с ограничение на количеството изразходван месечен трафик от крайните клиенти, което безспорно налага изграждането на съвременна надеждна хетерогенна географски разпределена компютърна комуникационна мрежа за подобряване на качеството на живот на населението и бизнеса в посочената област. Този проект и неговата реализация са част от настоящият дисертационен труд и е разработен съвместно с фирма „Трансбайт“ ООД с адрес на регистрация гр. Септември, ул. Хан Аспарух 24, Булстат 112648529.

2.1.1. Географска зона на покритие на проектната компютърна мрежа

На Фигура е показана зоната на покритие на проектната компютърна мрежа, която цели: осигуряване на надеждна връзка с Интернет на крайни и корпоративни потребители; осигуряване на неограничена по време и количество пренесени данни мрежова свързаност;



Фигура 8 – Зона на покритие на проектната компютърна комуникационна мрежа

осигуряване на връзка с Интернет и между крайните клиенти; осигуряване на ниска цена на предоставяната услуга. Общото обхванато население е над 48 хиляди души или около 16 хиляди домакинства, потенциални потребители на комуникационните услуги, реализирани от този проект.

Пазарните условия към момента на проучването за реализация на проекта не позволяват той да бъде осъществен икономически изгодно за инвеститора. За целта е дефинирана изрична необхо-

димост от проектиране и изграждане на собствено комуникационно трасе за пренос на Интернет свързаност от гр. София до гр. Септември с първоначален капацитет от 70Mbps двупосочно.

2.1.2. Комуникационни точки на опорното трасе за пренос на данни

Крайните комуникационни точки са разположени на територията на град София, в близост до връх Братия на Средна гора и в гр. Септември. Техните географски координати, описани във World Geodetic System WGS 84 DMS формат като градуси, минути и секунди северна ширина и източна дължина, както и надморската височина и котата на монтиране на приемо-предавателните параболични антени над нея, са посочени в Таблица 5.

Таблица 5 – Географски координати на комуникационните точки

Параметър		гр. София	RPTS - Братия	гр. Септември
географски координати WGS84 DMS	с. ш.	42° 39' 4.0"	42° 35' 51.0"	42° 12' 38.8"
	и. д.	23° 22' 48.0"	24° 9' 29.0"	24° 7' 40.2"
адрес		гр. София ж.к. Младост 1 бл. 27, ет.17	RPTS – вр. Братия НУРТС Панагюрище	гр. Септември бул. България 74 ет. 5
надморска височина		655 <i>m</i>	1516 <i>m</i>	240 <i>m</i>
кота антени над земната повърхност		+55 <i>m</i>	+30 <i>m</i>	+30 <i>m</i>

Изчислените чрез Google Earth разстояния между точките са както следва:

- гр. София – RPTS вр. Братия – 64.106 *km*
- RPTS вр. Братия – гр. Септември – 43.030 *km*

2.1.3. Критерии и стъпки за избор на технологично решение за изграждане на комуникационната връзка

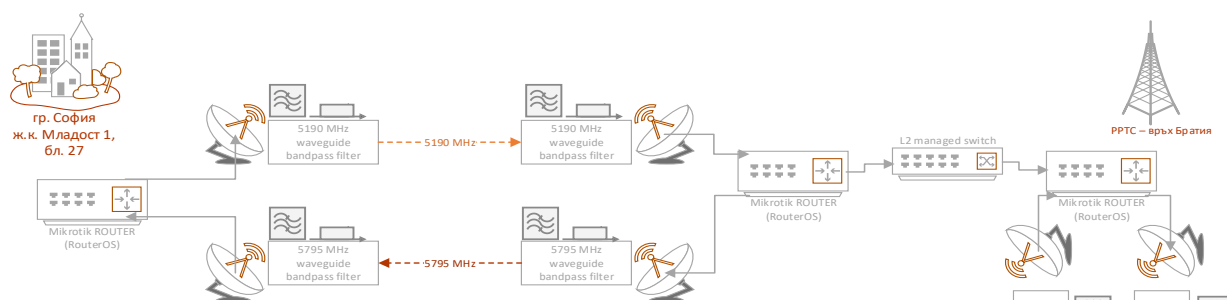
Технологичното решение за изграждане на връзката е съобразено със следните критерии и стъпки:

- избор/задание на координати на крайните комуникационни точки
- избор на радиочестотна технология съгласно техническите и икономически изисквания от инвеститора
- избор на необходимия хардуер за осъществяване на комуникационните връзки с избраната радиочестотна технология
- оглед на крайните комуникационни точки
- анализ на възможностите за осъществяване на комуникация с директна видимост (Line of Sight) между отделните точки
- експериментална проверка на работоспособността на избраните технологии с помощта на специално разработен за целта лабораторен стенд
- проектиране и изграждане на крайните антенни устройства
- проектиране на комуникационните възли за пренос на Интернет до гр. Септември (гр. София, RPTS – връх Братия, гр. Септември)

Направено е сравнение на достъпните към момента на техническа реализация на проекта стандарти за безжична комуникация, използващи свободна от лицензиране радиочестотна лента. Това е обусловено от изричното изискване да се използват освободени от лицензиране радио честоти и радиочестотни технологии за връзка.

След пазарно проучване на наличните хардуерни решения и съгласуване с инвеститора е избрано техническо решение - стандарт IEEE 802.11a-turbo, ISM Band 5 GHz, с работна честотна област от 4920 до 6100MHz, ширина на канала 40MHz и предаване/приемане на данните по протокол Mikrotik Nstreme/NV2, увеличаващ ефективната реална пропускателна способност на комуникационната връзка.

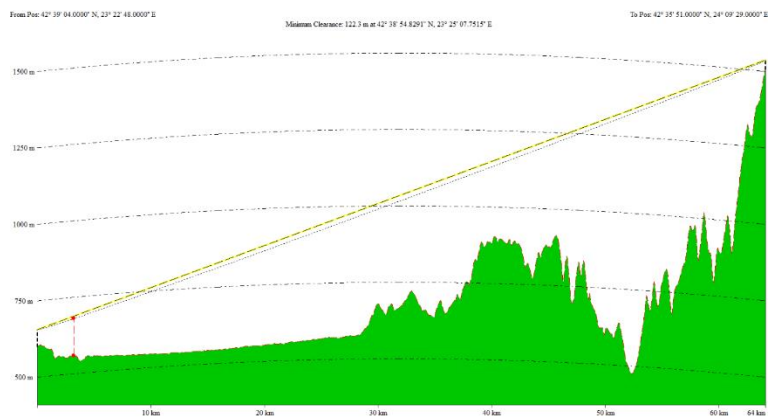
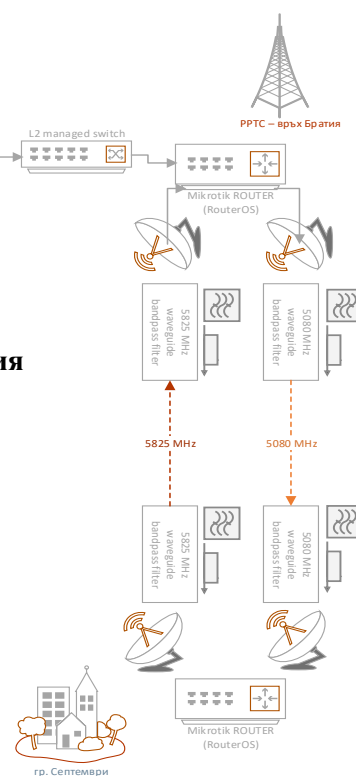
Използваните комуникационни канали отговарят на стандарта IEEE 802.11a, одобрен през юли 1999г. Използва се освободената от лицензиране честотна лента Industrial, Scientific and Medicine Band (ISM Band) 5 GHz, с ортогонална честотно – разделяща модулация (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing – OFDM) и QAM (амплитудно-фазова модулация) на подносещите честоти, с един радиочестотен поток (spatial stream) с широчина на честотния канал е 40 MHz (802.11a-Turbo), което позволява използването на 2400 подносещи честоти с интервал 15 KHz. За да се гарантира ортогоналността им, продължителността на символа е $66.7\mu s$, като всяка подносеща може да пренася данни със скорост 15 Ksymbol/s. За избраната честотна лента от 40MHz, скоростта на символите (symbol rate) е 19 Msymbol/s. С 64QAM кодиране, всеки символ е пренасян от 6 бита и имаме резултатна максимална ефирна скорост от 108 Mbps. Очакваната реална скорост на пренос на данни е 74 Mbps с използване на Mikrotik Nstreme/NV2.



Фигура 9 – Схема на комуникационната връзка гр. София – PPTC вр. Братия – гр. Септември

Схемата на свързване е показана на Фигура 9

Определянето на вертикалните профили на релефа, за целите на проектиране на комуникационните връзки, е извършено с цифров модел на релефа (Digital Elevation Model - DEM) ASTER DEM v.2 от 2011 година с разделителна способност 30 метра на приземно ниво и покритие от 83° North до 83° South Latitude. Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Global Elevation Model (GDEM) е свободен достъпен за използване от NASA Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC).



Фигура 10 – LOS clearance за радиочестотна връзка от гр. София до PPTC – вр. Братия на честота 5190 ±10 MHz

Сложността на релефа и големите разстояния между комуникационните възли налагат последващ анализ на възможността за осъществяване на безжична радиочестотна връзка с директна видимост (line of sight) между крайните антени.

Изчисляването на Infosight (LOS) профилите за двупосочните комуникационни връзки гр. София – PPTC вр. Братия и PPTC вр. Братия – гр. Септември е извършено с помощта на географската информационна система (GIS) Global Mapper версия 18.2 на Blue Marble Geographics.

Получените профили и изчислени резултати показват налична техническа възможност за осъществяване на безжична комуникационна връзка на избраните честоти при директна видимост между приемника и предавателя в двете крайни комуникационни точки – в гр. София и РРТС – вр. Братия, както и налична техническа възможност за осъществяване на безжична комуникационна връзка на избраните честоти при директна видимост между приемника и предавателя в двете крайни комуникационни точки – в гр. Септември и РРТС – вр. Братия. Разположението и височината на комуникационните точки в гр. София, РРТС – връх Братия и гр. Септември позволяват осъществяването на безжична радиочестотна комуникация по стандарт IEEE 802.11a/Mikrotik Nstreme/NV2 на избраните честоти.

2.2. Експериментален лабораторен стенд

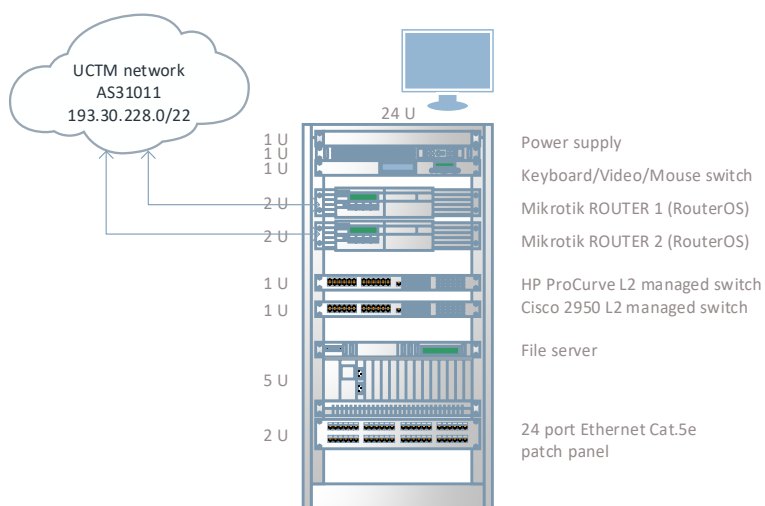
Тъй като при реализацията на географски разпределена хетерогенна комуникационна мрежа има редица проблеми, свързани с от една страна с технологично, и от друга – с финансово обезпечаване на проектната реализация, е необходимо ключовите параметри и технологични схеми да бъдат тествани и проверени в лабораторни условия. Изграждането на лабораторен стенд дава възможност за изследване и експериментиране с компонентите на мрежата, както и за оптимизация на решенията.

2.2.1. Хардуерна и софтуерна платформа на стенда

За проверка на избраните технологични решения е проектиран и разработен експериментален лабораторен стенд, състоящ се от два идентични маршрутизатора под управлението на мрежова операционна система Routers на Mikrotik, показан на Фигура 11.

Всеки маршрутизатор разполага с един физически 100Mbps Ethernet интерфейс, един физически 1000Mbps Ethernet интерфейс и два безжични 802.11a/b/g 2.4/5GHz интерфейса

с 3dBi omnidirectional антени, разположени върху преходни адаптери и PCI интерфейс. Стендът е разположен в лаборатория 196 в сграда В на ХТМУ – София и е свързан към университетската Интернет мрежа чрез двата 100Mbps Ethernet интерфейса.



Фигура 11 – Схема на лабораторен стенд

За хардуерна платформа са използвана x86 компютърна архитектура с процесори Intel Celeron 530D, 512MB DDR2 оперативна памет и 128MB IDE SSD флаш памет за инсталация и оперативна работа на RouterOS, монтирани в стандартен 19” комуникационен шкаф. Лицензите за Mikrotik RouterOS мрежова операционна система са закупени

по проект № 11004/2012 на ХТМУ – София.

Връзката към лабораторията се осъществява чрез два управляеми L2 комутатора (L2 switch) – HP ProCurve и Cisco 2950, свързани физически към 24 портове Cat.5e patch панел.

Разработени са следните експериментални конфигурационни схеми:

- конфигурационна схема point-to-multipoint връзка с използване на централизирана точка за достъп, кабелна връзка на крайните клиенти и сегментиране на мрежата;
- безжичен мост с използване на резервирана кабелна връзка и безжичен достъп на крайните клиенти;
- конфигурационна схема на безжичен L2 мост между два маршрутизатора с кабелна връзка на крайните клиенти, сегментиране на клиентските мрежи и използване на прозрачно филтриране и каширане чрез рогоху сървър ;
- конфигурационна схема с разпределяне на трафика и отработване на отказ от услуга.

2.3. Синтез на робастни регулатори за Internet базирано управление

Наблюдението на работата на географски разпределена компютърна мрежа и възможностите за нейното отдалечено управление са ключови фактори за осигуряване на високо качество на предоставяната услуга и ниска цена на текущата поддръжка от технически екипи на място.

2.3.1. Приложение на управляеми интелигентни микроконтролери за Internet базирано управление с методите на синтез на робастни регулатори

За тази цел във всички населени места са поставени управляеми интелигентни микроконтролерни модули TinyIP и PicoIP, произведени от Неомонтана ЕООД, които осигуряват възможността за следене на времезакъсненията, статистическите параметри на мрежовата свързаност (средни закъснения, стандартно отклонение на закъсненията, брой загубени пакети и др.), както и на напрежението по захранващите линии за вътрешноградските и вътрешноселските локални мрежи. Предаваните данни от тези сензори дават възможност за визуализацията на състоянието на мрежата в реално време, както и за генерирането на алармени състояния или отработването на събития като отпадане на захранване, прекъснато комуникационно трасе, повреда от гръмотевична буря, повреда в крайно клиентско устройство и други чрез управление на локалните мрежови захранвания и друго активно мрежово оборудване (медия конвертори, повторители, суичове).

Необходимо е да се провери дали такава гъвкава разпределена система за управление може да работи в условията на променливи закъснения, появяващи се при нормалната работа на комуникационна мрежа. Използването на Internet като комуникационна среда позволява реализацията на икономически изгодни и гъвкави разпределени системи за управление (PCY) – Distributed Control Systems (DCS), които обединяват разпределени в пространството елементи (сензори, изпълнителни устройства, регулатори и др.). Архитектурата им позволява приложения, при които например контролерите да бъдат разположени в офис среда или контролни центрове, а измерващите и изпълнителните устройства да бъдат в полето на технологичните процеси или в разгърнати в пространството хетерогенни компютърни мрежи.

Един от основните проблеми при Internet базираните PCY е, че комуникациите в мрежата имат променливи във времето закъснения в преноса на PDU, а мултиплексването на приложенията в многозадачен режим на операционната система на управляващите компютри може да е източник на неприемливи колебания във времето на изпълнение.

Закъсненията в преноса на данни в компютърните мрежи могат да се класифицират като: закъснения в управлението, шумове (jitter), грешки на преноса. Закъснението в канала на управление е времето между измерването на технологичната величина и формирането на управляващото въздействие. Ако обратната връзка на системата за управление се затваря през комуникационна мрежа, то включва изчислителните и комуникационните закъснения. Съществуват два подхода: синтез на система за управление (CAU), която компенсира закъсненията или проектиране на компютърна мрежа с постоянни закъснения. Въпросът е интердисциплинарен и е обект на изследване както в Теория на управлението, така и от

Computer Science. Шумът (jitter) може да бъде дефиниран като отклонения във времето на стартовите моменти на формиране на управляващи въздействия, в противоположност на предварително фиксираните моменти. Той зависи от точността на часовника, алгоритмите за диспечеризация, компютърната архитектура. При определено натоварване на системата и при условие, че поведението и е предсказуемо, влиянието на шума може да се компенсира, като се изберат по-големи тактове на дискретизация. Грешките при пренос най-често са следствие от нарушаване на комуникациите в компютърните мрежи. Те могат да имат следните последствия: загуба на информация, увеличаване на закъснението в канала на управлението, формиране на некоректно управляващо въздействие. Един от вариантите за възстановяване на загубите от тях е да се установи липсата на дискретно измерване в даден момент и управлението в следващия такт да се базира на моделно предсказване на стойността на регулируемата величина. По-сериозно затруднение възниква при временно прекъсване на комуникацията за няколко такта. Тези проблеми по същество са изключения, които трябва да се отработват от логиката на алгоритмите за управление. Промяната в такта на дискретизация е явление, което се среща по-рядко и има последици аналогични на закъсненията. Тя може да се появи например като резултат от отказ и спадане на производителността на компютърна система, мрежов преносен хардуер или запълване на капацитета на комуникационен канал.

Проблемът за закъсненията в комуникационните мрежи на системите за управление е привлякъл вниманието на много изследователи. Предлагани са различни подходи за елиминиране или за намаляване на влиянието на чистото закъснение върху устойчивостта на системата. Най-често се използват времеви буфери. В добавка някои изследователи се опитват да моделират комуникационното закъснение като стохастично, но ограничено.

2.3.2. Експериментално изследване на влиянието на чистите закъснения с използване на лабораторен стенд в среда на хетерогенна компютърна мрежа с динамично променяща се структура

Експерименталните данни за типични чисти закъснения са събрани с използването на разработения лабораторен стенд, описан в т.2.2, на територията на ХТМУ – гр. София. Събрани са представителни статистически извадки за четири типа разстояния в разпределена хетерогенна компютърна мрежа с динамично променяща се структура за симулиране поведението на система при работа Internet среда – в рамките на същата локална мрежа (Local Area Network, LAN), близко разстояние (Campus Area Network, CAN - съседни мрежови сегменти на територията на компютърната мрежа на ХТМУ – гр. София с номер на автономната система AS 31011 и IPv4 адресно пространство 193.30.228.0/24, 193.30.229.0/24, 193.30.230.0/24 и 193.30.231.0/24, агрегирано като 193.30.228.0/22), средно разстояние – мрежови възли на територията на Metropolitan Area Network (MAN) мрежата на гр. София, както и такива на територията на Република България, участващи в обмена на данни в BiX (Bulgarian Internet Exchange, Internet Exchange Point – IXP, член на European Internet Exchange Association Euro-IX) и далечно разстояние – (Wide Area Network, WAN) мрежови възли, разположени на територията на Съединените Американски Щати, Русия, Китай и Австралия. Чистите закъснения са измерени с помощта на Internet Control Message Protocol (ICMP) чрез icmp_echo_request и icmp_echo_reply и програмната им реализация като ping, hping, traceroute, pathping, mtr и подобни инструменти.

Чрез изпълнение по зададен времеви график с помощта на cron под управлението на операционна система Linux Ubuntu Server, версия 16.04 LTS са събрани данни за период от 12 месеца, през една секунда. Всяко измерено разстояние (локално, близко, средно, далечно) реализира статистическа извадка с обем (365 дни * 24 часа * 60 минути * 60 секунди) = 31 536 000 стойности.

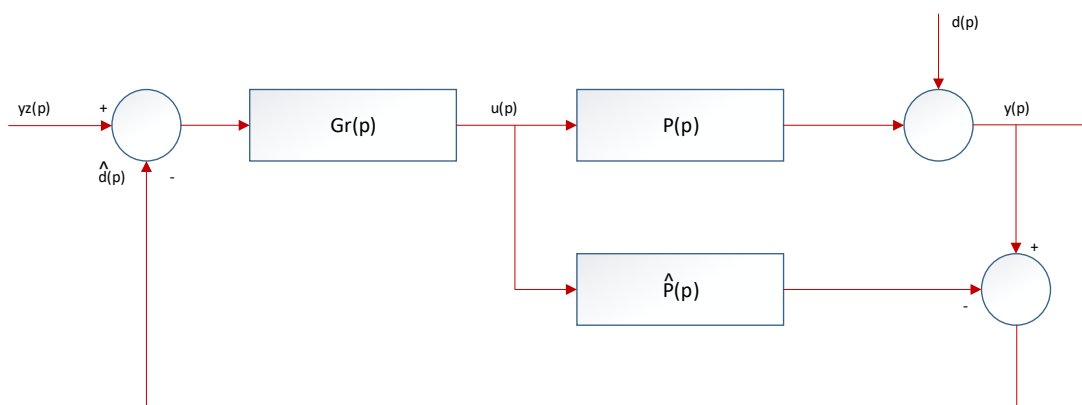
Определени са статистически оценки на разпределението – минимална и максимална стойност на времезакъснението, математическо очакване и стандартно отклонение. Резултатите са обобщени в Таблица 6.

Таблица 6 - Резултати от тестовите на времезакъсненията с лабораторния стенд

вид мрежа	географско местоположение		FQDN	AS number	small packets (56B/84B), ms				large packets (1472B/1500B), ms			
					min	max	avg	stdv	min	max	avg	stdv
LAN	София	42.6555,23.3567	lab196.uctm.edu	-	0.362	28.394	0.782	0.674	1.061	11.782	1.216	0.163
CAN	София	42.6553, 23.3562	router.uctm.edu	AS31011	0.735	12.519	1.06	0.196	2.340	35.586	2.473	0.367
MAN	София	42.6975, 23.3241	abv.bg	AS13147	1.477	22.141	3.866	2.571	3.759	71.641	6.773	2.954
WAN	България, Бургас	42.4947, 27.4677	burgas.bg	AS201200	1.614	121.550	4.796	6.691	3.881	57.734	6.299	3.220
GAN	Русия	55.7520, 37.6150	yandex.ru	AS13238	64.905	84.673	67.609	2.231	67.218	106.464	68.952	1.933
GAN	Ирландия, Дъблин	53.3331, -6.2489	amazon.de	AS16509	58.777	76.685	61.961	2.181	61.036	77.582	63.999	2.424
GAN	Китай	39.9075, 116.3972	sina.com.cn	AS4808	269.874	296.338	274.737	4.422	272.030	317.805	276.078	4.320
GAN	САЩ	37.4538, 122.1822	facebook.com	AS32934	1.320	19.077	3.153	1.733	3.579	45.511	5.053	1.647
GAN	Австралия	-33.8678, 151.2073	cityofsydney.nsw.gov.au	AS55532	335.701	373.830	338.418	3.548	338.184	375.298	341.010	3.837

2.3.3. Синтез на робастен по отношение на чистото закъснение регулатор

Теорията на робастното управление предлага възможност за решаване на проблема с чистите закъснения в Интернет и в географски разпределени хетерогенни мрежи, като се основава на компромис между точността и устойчивостта на системите за автоматично регулиране (CAR). Подходът използва апарата на система за автоматично регулиране с вътрешен (еталонен) модел на обект на управление с отрицателна обратна връзка (2).



Фигура 12 – Принципна схема на CAR

Структурата има определени преимущества – при смущение по задание тя функционира като отворена, при което изискването за точно възпроизвеждане на заданието $y_z(p)$ от регулируемата величина се свежда до изпълнение на условието

$$Gr(p)P(p) = 1, Gr(p) = \frac{1}{P(p)} \quad (\text{II. 1})$$

В този случай регулаторът $Gr(p)$ може напълно да компенсира закъсненията в обекта на управление. Ако смущението, приведено към изхода на последния, е различно от нула, сигналът в обратната връзка също е различен от нула. Следователно системата функционира с обратна връзка по отклонение на регулируемата величина, т.е. структурата обединява предимствата на отворените и затворените CAR, изразяващи се във високо

бързодействие на системата и пълно компенсиране на смущенията. Предавателната функция на еквивалентния регулатор в схемата има вида

$$C_e(p) = Gr(p)[1 - Gr(p)\hat{P}(p)]^{-1} \quad (\text{II. 2})$$

Еквивалентният обект на регулатора $C_e(p)$ е

$$P_e(p) = P(p) \quad (\text{II. 3})$$

Способността на САР да потиска смущенията $d(p)$, приведени към изхода на обекта на управление, се определя от предавателната функция по канала „смущение – регулируема величина“, известна като функция на чувствителност $S(p)$. Висока динамична точност на САР се гарантира, ако в целия работен честотен диапазон модулът $|S(j\omega)|$ клони към нула. В уравнението за $C_e(p)$ за $G_r(p)$ често се получават физически нереализуеми математически изрази. Ето защо моделът на обекта се факторизира, като при синтеза се използва онази част от описанието, която може да се инвертира (P_M). За да се намали прекомерното усилване на сигнала при високите честоти, последователно на регулатора се включва филтър с предавателна функция

$$f(p) = \frac{1}{(T_f p + 1)^n} \quad (\text{II. 4})$$

където n е степенен показател, който зависи от $P_M^{-1}(p)$, а T_f се избира така, че САР да удовлетворява изискванията за динамична точност.

Тогава:

$$C_r(p) = \hat{P}_M^{-1}(p)f(p) \quad (\text{II. 5})$$

Описанието на обектите на управление ($P(p)$) се базира на уравненията на материалния и енергиен баланс. В повечето случаи те могат да се опишат с достатъчна точност при зададена структура като звена с чисто закъснение. Поради проблемите при комуникациите в компютърните мрежи в последното се внася неопределеност от мултипликативен тип δ_d

$$P(p) = \frac{k}{[T_p + 1]} * \exp[-p(\tau_d + \delta_d)] \quad (\text{II. 6})$$

Функцията на неопределеност $W_3(p)$ за този случай има вида

$$W_3(p) = \frac{\delta_D p}{(\delta_D/2)p + 1} \quad (\text{II. 7})$$

Структурата на функцията, която определя динамичната точност на SISO системи $W_1(p)$ може да се дефинира въз основа на ограничението определящо свойството на САР да потиска смущенията

$$|S(j\omega)| \leq |W_1^{-1}(j\omega)| \quad (\text{II. 8})$$

С филтър от първи ред изпълнението на това условие се проверява най-удобно, ако лявата и дясна част има сходна структура, т.е. $W_1(p)$ се дефинира като

$$W_1(j\omega) = \left(\frac{T_W j\omega + 1}{T_W j\omega} \right) K_W \quad (\text{II. 9})$$

където с T_W е означена времеконстантата на функцията, а с K_W – коефициент на настройка. От изискването функцията на чувствителност да клони към нула следва, че е необходимо регулаторът да отговаря на условието

$$Gr(p) = \hat{P}_M^{-1}(p) = \frac{1}{K} (T_p + 1) \quad (\text{II. 10})$$

За да бъде реализуем той обаче, последователно с него трябва да се свърже филтър от втори ред. Еквивалентната предавателна функция след заместване в уравнението за $C_e(p)$ по-горе е

$$C_e(p) = \frac{1}{K} \frac{(Tp+1)}{T_f p} = \frac{T}{kT_f} \left(1 + \frac{1}{Tp}\right) \quad (\text{II. 11})$$

Този регулатор има свойства на ПИ алгоритъм с предавателен коефициент $K_p = T/kT_f$ и време на интегриране $T_i = T$. Тъй като синтезираният регулатор е астатичен, грешката на САР в установен режим е нула. Друга важна особеност е, че практически единственият неизвестен параметър за настройка е времеконстантата на филтъра T_f . Когато функциите $W_1(p)$ и $W_3(p)$ са зададени, теоремите за робастна точност и робастна устойчивост се свеждат до изпълнение на следните неравенства

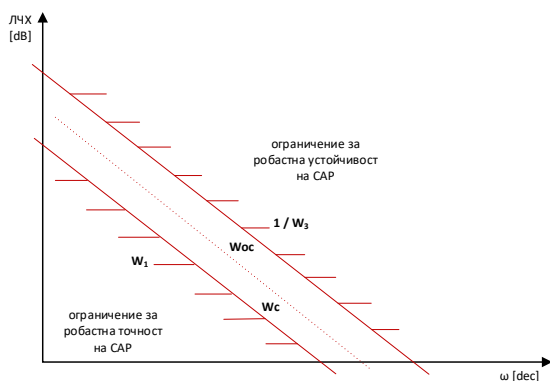
$$|S(j\omega)| \geq |W_1(j\omega)|, \quad |S(j\omega)| \leq |W_3(j\omega)|^{-1} \quad (\text{II. 12})$$

Някои опростявания позволяват смисълът на израза в равнината на логаритмичните амплитудно-честотни характеристики да се модифицира в изискването ходографът на отворената САР да попада над $|W_1(j\omega)|$ и под $|1 / W_3(j\omega)|$. Ако $W_1(j\omega)$ и $W_3(j\omega)$ имат вида

$$W_1(j\omega) = \left(\frac{T_w j\omega + 1}{T_w j\omega}\right) K_w, \quad W_3(p) = \frac{\delta_D p}{(\delta_D/2)p + 1} \quad (\text{II. 13})$$

допустимата област от значения за T_f е

$$T_w \geq T_f \geq \delta_D \quad (\text{II. 14})$$



Фигура 13 – Граници на робастна устойчивост

Дясната част на неравенството се дефинира от неопределеността в чистото закъснение. Съществува еднозначна зависимост между значението на времеконстантата T_w и показателите за статична и динамична точност на САР. В заключение можем да кажем, че методиката за синтез на робастен регулатор с еталонен модел е много подходяща за неопределености в обекта на управление от мултипликативен тип. Закъсненията в комуникациите в широкообхватни хетерогенни разпределени компютърни мрежи и в Интернет могат

удачно да се представят като такива, с изключение на прекъсванията. Ето защо функцията на неопределеност $W_3(p)$ е ефективно средство за дефиниране на границата на робастна устойчивост за разпределени системи за управление (Фигура 3).

От друга страна съществуващата връзка между времеконстантите на обекта на управление и параметрите на функцията, дефинираща точността на САР $W_1(p)$ гарантира достигане на желаните показатели на динамична точност. Необходимо е обаче контролерът да следи за прекъсвания в комуникациите, и при наличие на такива да оценява стойността на процесната променлива чрез модел. При обекти с по-големи времеконстанти е възможно вместо оценка да се използва последната измерена стойност.

2.4. SNMP модул за наблюдение на закъсненията и управление на захранването

SNMP (Simple Network Management Protocol) е стандартизиран протокол за събиране на информация, организиране на информацията и управление на свързани мрежови устройства. Той е част от IETF Internet Protocol Suite и съдържа набор от стандарти за управление на мрежата, включващи протокол в приложния слой, схема на база данни и набор от обекти. При неговата работа един или повече административни мрежови възли

(наричани managers) изпълняват задачата за наблюдение и управление на група от мрежови възли, формиращи обособена част от компютърна мрежа. Всяка управляема система изпълнява софтуерен компонент (agent), който позволява еднопосочна (само за четене) или двупосочна (четене и промяна на параметри) комуникация с управляващия възел. Трите актуални версии на протокола SNMPv1, SNMPv2 и SNMPv3 са описани в поредица от RFC документи: RFC1155, RFC1156, RFC1157, RFC1901, RFC3410, както и в стандарта STD 62, съдържащ RFC3411 до RFC3418.

Всяка мрежа, управлявана с SNMP се състои от 3 ключови компоненти:

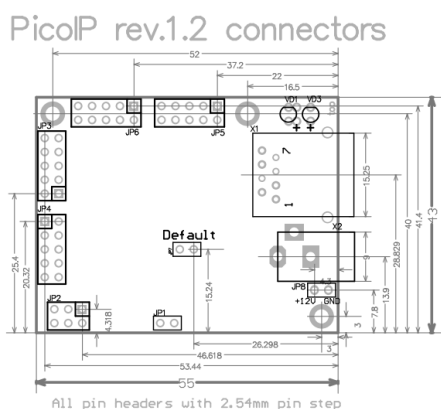
1. Управлявани устройства (УУ): мрежов възел, който съдържа SNMP агент и се намира в управлявана мрежа - събира и съхранява информация за управлението и я предава на системите за управление на мрежи посредством протокола SNMP.
2. Агенти: софтуерен модул за управление на мрежи, който се намира в УУ. Агента поддържа локална база от знания за управление на мрежи, която трансформира във форма, подходяща за SNMP трансфера.
3. Системи за управление на мрежи (NMS, network management system): изпълняват приложения, следящи и контролиращи управляваните устройства. NMS предоставят ресурсите (памет, процесорна мощ) за мрежовото управление. Във всяка управлявана мрежа трябва да има поне една NMS система.

Информацията, която се изисква за мрежовото управление се съхранява йерархично в управляваща информационна база (MIB, Management Information Base).

SNMPv1: Версия 1 е първоначалната имплементация на SNMP и работи върху протоколи като UDP (User Datagram Protocol), IP, CLNS, AppleTalk DDP и IPX. Първата версия на SNMP дефинира високо структурирани таблици, в които се групират инстанциите на табуларен обект (с повече променливи). Таблиците се състоят от 0 или повече редове, които се индексират така, че SNMP да може лесно да извлече или изтрие цял ред с единична команда (като Get, GetNext или Set).

2.4.1. Приложение на SNMPv1 за наблюдение в реално време на времезакъсненията и температурните режими на локалните захранвания на комуникационните трасета

За наблюдение в реално време на времезакъсненията и температурните режими на локалните захранвания на комуникационните трасета е реализирана разпределена система под управлението на SNMPv1 и хардуерни модули PicoIP, произведени от Неомонтана Електроникс ЕООД.



Фигура 14 – PicoIP интегриран IP управляващ модул с поддръжка на SNMPv1

PicoIP е интегриран IP модул, разработен от българската фирма Неомонтана Електроникс ЕООД. Предлага поддръжка на широк обхват от възможности за наблюдение (2x8 цифрови входа, 1x8 комбиниран A/D вход с 10bit ADC и входно напрежение 0-3.3V DC) и управление (1x8 цифрови изходи с поддръжка на комуникационни протоколи IP, MAC, VLAN, SNMPv1, ARP, 802.1q). Ниската цена, вграденият 10/100BaseTx 802.3 Ethernet мрежов интерфейс и пълноценната поддръжка на SNMPv1, както и ниската консумация на енергия (под 50mA при захранващо напрежение 12V DC, с възможност за захранване от 7.5 до 25V DC) го правят изключително подходящ избор за практическата реализация на разпределената система.

2.4.2. Инсталирани сензори в населените места

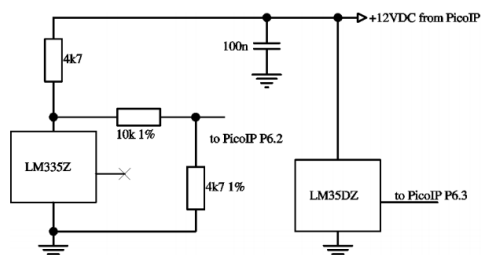
В Таблица 7 е показано разпределението на броя на инсталираните модули по населени места, както и измерваните параметри – времезакъснение на ICMP echo_request до обслужващ маршрутизатор с възможност за рестартиране на захранването на мрежата и температура на захранващото устройство на кабелното трасе.

Таблица 7 – Инсталирани сензори в реализираната компютърна мрежа за разпределената система за наблюдение на времезакъсненията и температурата на захранващите устройства

Община	Населено място	сензори PicoIP, брой	наблюдавани параметри, брой	
			времезакъснения msec	температура °C
Пазарджик	с. Алеко Константиново	6	6	4
	с. Звъничево	4	4	3
	с. Паталеница	4	4	2
	с. Црънча	4	4	2
	с. Ивайло	5	5	3
	с. Дебръщица	4	4	2
Белово	гр. Белово	12	10	6
	с. Аканджиево	2	2	2
	с. Дъбравите	2	2	2
	с. Мененкьово	4	4	2
	с. Момина клисура	6	6	4
	с. Сестримо	8	8	4
Септември	гр. Септември	31	24	6
	гр. Ветрен	11	8	5
	с. Бошуля	5	5	3
	с. Ветрен дол	5	5	3
	с. Виноградец	10	6	6
	с. Злокучене	4	4	2
	с. Карабунар	7	6	3
	с. Ковачево	5	4	2
	с. Лозен	5	4	2
	с. Семчиново	8	6	4
	с. Симеоновец	7	6	3
общо		159	137	75

2.4.3. Измерване на температурата на локалните захранвания на комуникационните трасета

Измерването на температурата е реализирано чрез интегрална схема LM335Z в корпус TO-92 с работна температурен обхват на измерване от -40 до +100 °C, като изхода от схемата на Фигура 5 се подава на един от цифровите входове на PicoIP. След преобразуване на напрежението от 10 битовия АЦП, температурата може да бъде прочетена централизирано чрез SNMPv1 заявка.



Фигура 15 – Измерване на температурата чрез LM335Z, свързана към цифров вход на PicoIP

Общият брой на сензорите във всички населени места е 159, като 137 от тях се използват за измерване на времезакъсненията в разпределената компютърна мрежа, а 75 наблюдават температурата на локалните захранващи устройства.

2.4.4. Библиотека *snmp_lib* за централизиран достъп до сензорите

Реализирана е библиотека *snmp_lib.php* на програмния език PHP, с която се осъществява централизиран достъп до всеки сензор. Програмният код е представен в Приложение 2.1.

2.4.5. Централизирана система за наблюдение и управление на мрежата

Реализираните функции се използват от централизирана система за наблюдение и управление IPAsst, като програмен модул извършва следните функции за наблюдение на времезакъсненията:

- проверява на всеки 180 секунди времезакъснението до всеки от инсталираните сензори, като изпраща 10 тестови ICMP echo_request пакета с максималния възможен размер (определен от MTU=1500B на 1472 байта + 28B protocol overhead от IPv4 и ICMP протокола), анализира получените резултати и изчислява оценка на математическото очакване и стандартно отклонение. Получените стойности на оценките на статистическото разпределение се сравняват с предварително зададени за всеки от сензорите, като се изчисляват на базата на прост регресионен модел с отчитане на часа от денонощието, деня от седмицата и общото натоварване на цялата мрежа (като количество входящ и изходящ трафик и брой пакети в секунда в двете посоки) и доверителен интервал, изчислен по правилото на трите сигми.
- при липса на пропуснати icmp_echo_replay пакети (0% packet loss) и нормални статистически граници на измереното закъснение теста се повтаря отново след 180 секунди.
- при различен от 0% packet loss, или при отклонение от очакваните статистически параметри се генерира предупредително съобщение в дневника на информационната система и се преминава към режим на проверка на всеки 60 секунди с минимален размер на icmp_echo_request пакетите до сензора, в който са регистрирани отклонения.
- при връщане на системата към обичайните очаквани параметри след 10 последователни теста се генерира информационно съобщение в управляващата система и се преминава към работа в режим с интервал 10 секунди.
- при отпадане на връзката до сензора (100% packet loss) или при нарушени очаквани статистически параметри на времезакъсненията след 10 последователни теста (10 минути) се генерира алармено съобщение в информационната система и се изпраща SMS известие до мрежов администратор.

Друг програмен модул следи температурата на локалните хранящи устройства, като прочита три последователни измервания през 300 секунди, осреднява получената стойност и я сравнява със текущата средна стойност на останалите сензори в населеното място, текущата средна стойност за цялата мрежа и очакваната среднодневна температура за населеното място. При нарушаване на изчисления интервал от $t_{average} \pm stdev_t$ се генерира предупредително съобщение в централизираната система за управление.

При липса на точни данни за населеното място са използвани данни от най-близката метеостанция с данни в Meteoblue и корекция според надморската височина с температурен градиент от $dT/dz = -0.009 \text{ } ^\circ\text{C}/m$

2.5. Изводи

1. След проучването и анализа на необходимостта от осигуряване на Интернет свързаност в района на зададен географски район е установено, че в района на гр. Септември, област Пазарджик към годината на изследването не е изградена

- цялостна мрежа за пренос на данни и Интернет свързаност от една страна, а броят на потенциалните потребители на услугата е значителен от друга.
2. Проектирано е и е изградено безжично преносно трасе от гр. София, през РРТС вр. Братия до гр. Септември с обща дължина над 107 км. при което са установени необходимите технически параметри и безжични стандарти за комуникация, на цената, зададена в проекта на инвеститора. Установено е, че мрежата е изградена с много по-ниска себестойност от предлаганите на пазара решения и съпоставима надеждност и качество на услугата.
 3. Проектиран и разработен е лабораторен експериментален стенд за изследване на мрежови конфигурации и работата на мрежови протоколи. В резултат на проведеното изследване е установена пригодността на стенда за статистическа оценка на качеството на предоставяните услуги. Допълнително преимущество на лабораторния стенд е възможността за провеждането на учебно-преподавателска и научна работа с него. Разработката е представена на научна постерна сесия на ХТМУ – гр. София и е класирана на I-во място в секцията и удостоена с грамота.
 4. Изследвана е възможността да се синтезират робастни регулатори за управление в Интернет среда в хетерогенни широкообхватни компютърни мрежи с променливи времезакъснения. Резултатите от това изследване са публикувани в статия.
 5. Разработена е разпределена SNMPv1-базирана система за дистанционно наблюдение на параметри на околната среда и параметри на работата на компютърната мрежа, както и за дистанционно управление на хранването на мрежата.

3. РАЗПРЕДЕЛЕНА СИСТЕМА ЗА МОНИТОРИНГ НА УСЛОВИЯТА НА ЖИЗНЕНА СРЕДА В ЗАТВОРЕНИ ПОМЕЩЕНИЯ

3.1. Условия на жизнената среда и нормативни изисквания за детски градини и училищни класни стаи

Изграждането на автоматизирана система за събиране на данни за микроклимата на затворени помещения и наблюдението им в рамките на учреждение тип детска градина или училище има ключова роля за опазване здравето на децата и персонала ангажиран с възпитаването им, за повишаване на качеството на учебния процес, и за повишаване енергийната ефективност на сградите. Наличието на подобен тип информация е наложително и регламентирано в нормативните документи, касаещи здравните изисквания към детските градини. Развитието на информационните технологии и наличието на съвременни технически средства за автоматизация позволяват лесното и прецизно измерване на важни контролируеми параметри на жизнената среда: температура, относителна влажност на въздуха, осветеност, концентрация на CO₂ (в ppm), TVOC (ЛОС - летливи органични съединения, в ppb), шум и други.

3.1.1. Параметри на околната среда, значими за сградите за образование и наука

Параметрите, свързани с удовлетворяването на изискванията за хигиена и здраве, приложими за сградите за образование и наука са, както следва:

1. Контролируеми параметри, които отчитат условията на обитаване, въздействията на вложените в строежа строителни продукти и на технологичното оборудване: емисии от опасни вещества, опасни лъчения; летливи органични съединения, парникови газове или опасни частици във въздуха вътре или навън; отделяне на токсичен газ; материали, предизвикващи реакция при допир с кожата; условия за развитие и миграция на

микроорганизми, паразити, насекоми и вредни гризачи; вредни въздействия върху обитателите.

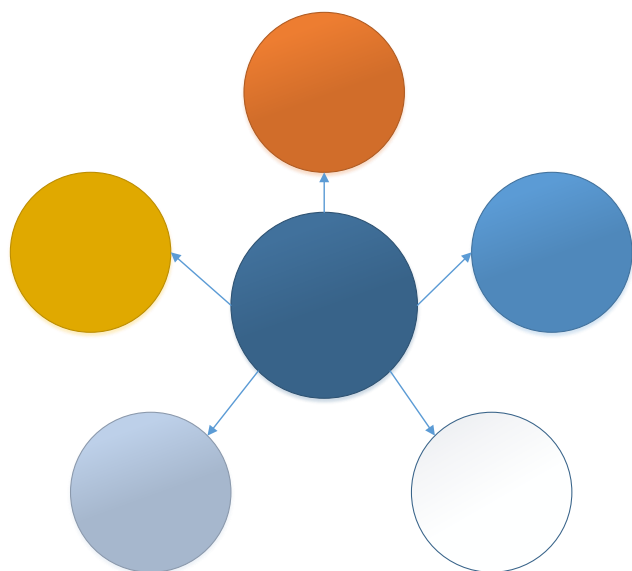
2. Параметри, които отчитат физични фактори на жизнената среда: температура на въздуха; защита от слънчево греење; относителна влажност на въздуха; скорост на движение на въздуха; чистота и кратност на обмяна на въздуха; съотношение между използването на изкуствено и естествено осветление, параметри на изкуственото осветление (средна поддържана осветеност, обобщена степен на яркостен дискомфорт и индекс на цвето предаване, параметри на естественото осветление (коефициент на светлопропускливост на остъкляването за странично и/или горно естествено осветление); хидроизолация и защита от влага отвън; качество на питейната вода; създадени условия по отношение на безопасността на предлаганите храни и напитки в зоните за хранене.

3.1.2. Методи и стандарти за оценка на качеството на вътрешната околна среда

Качество на вътрешната околна среда е прието при изграждане на системи за класифициране като BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method - Метод за оценка на околната среда на сградата), BEPAC (Building environmental performance assessment criteria, Критерии за оценка на ефективността на строителната среда) и HK BEAM (Хонг Конг). Усещането за комфорт е смесено състояние на психологическите реакции на обитателите на физическите сетива според параметрите на околната среда. При проектиране на отоплителни и климатични инсталации се използват регламентираните в

DIN1946 температурна зона на комфорта – температура от 20°C до 26°C, относителна въздушна влажност от 30% до 65% и абсолютна въздушна влажност не повече от 11.5 g/kg. Преизчислената относителна въздушна влажност (ОВВ) при зададена максимална абсолютна влажност 11.5 g/kg е следната: до 22°C максимална 65% ОВВ, при 23°C максимална 62% ОВВ, при 24°C максимална 58% ОВВ, при 25°C максимална 55% ОВВ и при 26°C максимална 52% ОВВ.

ANSI/ASHRAE стандарт 55-2010, наследяващ ANSI/ASHRAE стандарт 55-2004 (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) дефинира алтернативни на европейските норми, със значително по-широки граници на допустимата относителна влажност на въздуха (от 20% до 83%).



Фигура 16 - Параметри на човешкия комфорт

Усреднените идеални стойности според двете методологии са:

- зимен режим - 22°C при 45% относителна въздушна влажност;
- летен режим – 24°C при 45% относителна въздушна влажност.

Определят се пет основни параметри на човешкия комфорт, обуславящи стаения микроклимат, показани на Фигура 6.

3.1.3. Параметри, компоненти на комфорт за жилищна среда и нормативни изисквания

Стойностите на параметрите на микроклимата в помещенията зависят от редица фактори, сред тях са климатичните условия и сезоните; видът на провежданите дейности в тях и използваното оборудване; условията на въздухообмен; размерът на помещението; броят на пребиваващите хора и т. н. Също така те могат да варират в рамките на деня или

да бъдат с различни стойности в отделни участъци на едно и също помещение. Балансираната топлинна среда е от съществено значение в детските заведения затова съществуват изисквания, регламентирани в **Наредба № 3 от 5 февруари 2007 г. за здравните изисквания към детските градини.**

Съгласно Чл.2. от нея здравните изисквания се отнасят до:

1. сградите и помещенията;
2. оборудването и обзавеждането на помещенията;
3. факторите на средата;
4. дейността в детската градина.

Хигиенният оптимум на всеки от двата избрани параметъра за проследяване се посочени в **Раздел IV от Наредбата**. Подробно разписани минимални изисквания към параметрите на микроклимата за типични помещения по видове сгради за образование и наука са посочени в Чл.87 от Глава седма „*Специфични изисквания към експлоатационните показатели на контролируемите параметри за удовлетворяване на основните изисквания към сградите за образование и наука*“ от **Наредба № РД-02-20-3 от 21 декември 2015 г.** за проектиране, изпълнение и поддържане на сгради за обществено обслужване в областта на образованието и науката, здравеопазването, културата и изкуствата.

Таблица 8 – Здравни изисквания към факторите на средата според Наредба № РД-02-20-3/21.12.2015 на МРРБ

Вид помещение		Температура на усещането		Минимален дебит на пресния въздух l/s . m ²
		лято	зима	
		°C	°C	
2. Детски заведения				
2.1	Изоляционно помещение със санитарен (хигиенен) възел	23.5 ± 2.5	20.0 ± 3.5	-
2.2	Спалня, занималня и кът за хранене	23.5 ± 2.5	20.0 ± 3.5	2.8
2.3	Закрити помещения за спорт или за музикални занимания	-	20 ± 2	4.2
2.4	Съблекалня с преддверие и гардероб		20 ± 2	-
2.5	Тоалетна и умивалня	-	25 ± 2	-
2.6	Здравен кабинет	23.5 ± 2.5	20.0 ± 3.5	0.8
2.7	Коридори и стълбища	-	10 ÷ 20	-
2.8	Административни помещения	-	22.0 ± 3.0	0.8
2.9	Помещение за приемане и разпределяне на храна	-	18 ± 2	-
2.1	Складови помещения към перални	-	18 ± 2	-
2.1	Кухненски блок (подготовка на храна до 15 деца)	-	15 ± 2	-
2.1	Кухненски блок (подготовка на храна над 15 деца)	-	15 ± 2	-
2.1	Пералня (с капацитет за изпиране на бельо за до 150 деца)	-	18 ± 2	-
2.1	Пералня (с капацитет за изпиране на бельо за над 150 деца)	-	18 ± 2	-
2.2	Басейн	28 ± 2	28 ± 2	10
2.2	Съблекалня към басейн	-	25 ± 2	-

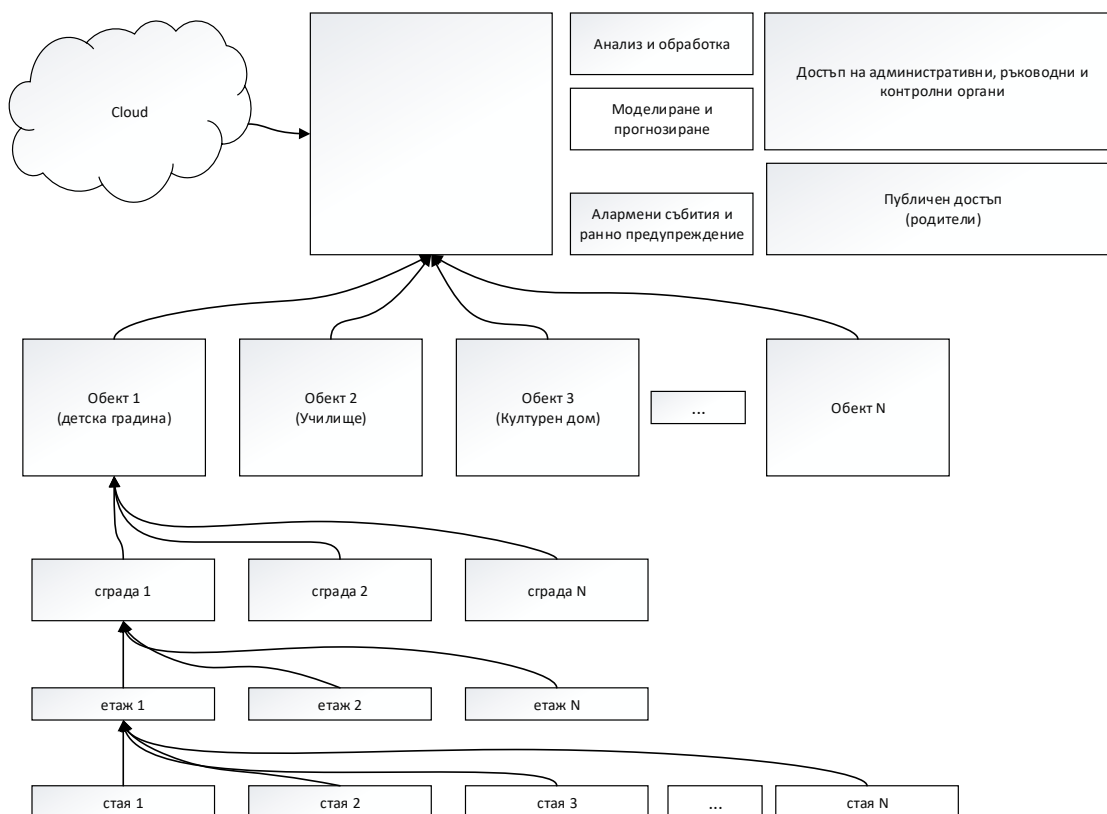
Според Наредбата, температурата на въздуха може да се приеме за приблизително равна на температурата на усещане.

3.2. Разпределена система за мониторинг на параметрите на комфорт на жилищна среда

Наличните системи за мониторинг предлагат решения само за локално наблюдение и запис на параметрите, без възможности за интерпретация, анализ, ранни предупреждения на базата на модели и прогнозиране, алармени събития и други. Това обуславя

необходимостта от създаване на разпределена система за наблюдение в реално време на тези параметри, както и централизирано съхранение, визуализация и анализ на събираните данни, със структура показана на Фигура 7.

За крайните измервателни устройства, предвидени да се разполагат във всяка стая е



Фигура 17 – Разпределена система за мониторинг на условията на жизнена среда в затворени помещения

избрана е хардуерна платформа, базирана на микроконтролер Arduino.

Ардуино е проект с отворен код, създаден с основна цел проектиране и производство на електронна платформа с лесен за ползване свободен хардуер и софтуер. Проектът е основан на семейство платки с микроконтролери, които използват различни 8-битови (AVR) микроконтролери или 32-битови (ARM) процесори Atmel. Платформата предоставя интегрирана среда за разработка (IDE), основана на проекта Processing, който поддържа програмните езици C и C++. Първата платка Ардуино е представена през 2005 г. Arduino се състои от 8-битов Atmel микроконтролер с AVR архитектура с допълващи се компоненти, които улесняват програмирането и включването в други вериги. Налични са стандартни конектори, които позволяват свързването на CPU платката към голям набор от различни, взаимнозаменяеми модули (shields).

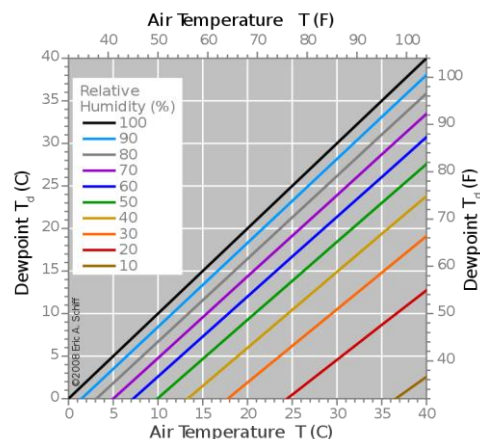
Направено е сравнение на характеристиките на три хардуерни платформи, приложими за решаване на настоящата задача – Arduino UNO R3 (ATMega328), Arduino Nano (ATMega128 или ATMega328) и ESP8266. Избрана е първата платформа, поради достъпната цена, ниската консумация на енергия и факта, че напълно покрива нуждите на една такава система.

3.2.3. Изчисляване на точка на оросяване (Dew Point)

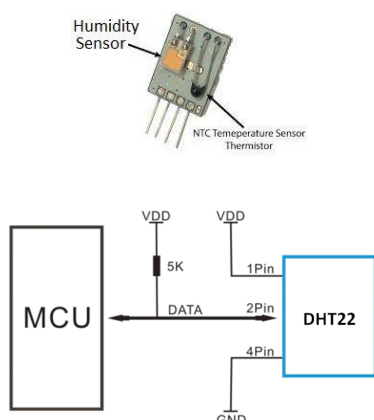
За изчисляване на точката на оросяване е реализирана функция, базирана на формулата на Магнус за изчисляване на точката на оросяване при зададена въздушна температура и относителна влажност:

$$\text{dewPoint}(T, RH) = \ln\left(\frac{RX}{100}\right) + \frac{b \cdot T}{c + T} \quad (\text{III. 1})$$

```
// calculate Dewpoint from RH% and temperature oC
float calcDewpoint(float h, float t) {
    float k;
    k = log(h/100) + (17.62 * t) / (243.12 + t);
    return 243.12 * k / (17.62 - k);
}
```



Фигура 20 – Графика на зависимостта на точката на оросяване от температурата на въздуха и относителната влажност



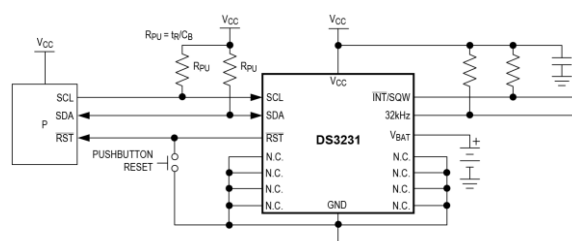
Фигура 21 – Свързване на DHT22 към микроконтролера

Сензорът DHT22/AM2302 за температура и относителна влажност използва NTC термистор и полимерен кондензатор като чувствителни елементи и има вграден 8-битов микроконтролер за цифров достъп до данните по сериен интерфейс. Има фабрично калибриран цифров изход и се отличава с голяма надеждност и стабилност. Разполага с троен интерфейсен конектор и монтажен отвор. Захранва се и работи с напрежение 3,3V – 5 V. Измерваната относителна влажност е от 0% до 100%, с точност $\pm 2\%$ (при 25 °C) и разделителна способност 0.1%. Измерваната температура е от -40 °C до 125 °C, с точност $\pm 0.5^\circ\text{C}$ и разделителна способност 0.1°C. Честота на прочитане на данните е 0.5Hz (2 s). Стойността на *sensor.min_delay* се установява като период за прочитане на данните от сензора, с което

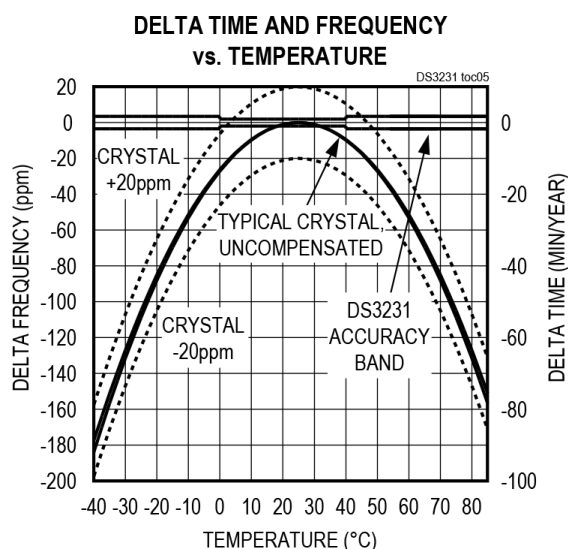
се задава минимално възможния период между отделните измервания. В следствие това се използва в централизираната система за пълзящо осредняване и филтриране на данните. След получаване на измерванията за температура и относителна влажност се изчисляват точката на оросяване и топлинният индекс.

3.2.4. RTC със сверяване чрез NTP протокол

Часовникът за реално време е реализиран с интегралната схема DS3231, която се отличава с много ниска консумация на енергия и висока точност - $\pm 2\text{ppm}$ при температура от 0 до 40 °C и $\pm 3.5\text{ppm}$ при температура от -40 до +85 °C. Информацията за дата, час, минути, секунди се прочита и използва при генериране на записите от измерванията в локалния регистрационен файл върху SD картата.



Фигура 22 – Схема за свързване на RTC DS3231 към I2C шината

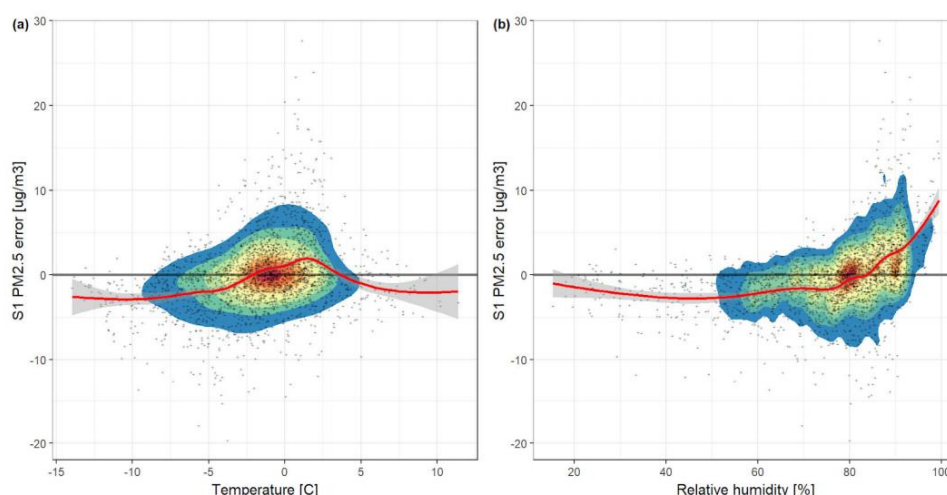


Фигура 23 – Точност на часовника в зависимост от работната температура

изчакване и захранващо напрежение от 1.8 до 3.3 V позволява лесна интеграция в мобилни системи за мониторинг на качеството на въздуха. Измерените стойности за еквивалентен въглероден диоксид са от 400 до 8192 *ppm*, а за TVOC (Total Volatile Organic Compound) от 0 до 1187 *ppb*. Според спецификацията на производителя е чувствителен към алкохоли, алдехиди, кетони, оргранични киселини, амини, алифатни и ароматни въглеводороди.

3.2.5. Сензор за фини прахови частици (ФПЧ_{2.5} и ФПЧ₁₀)

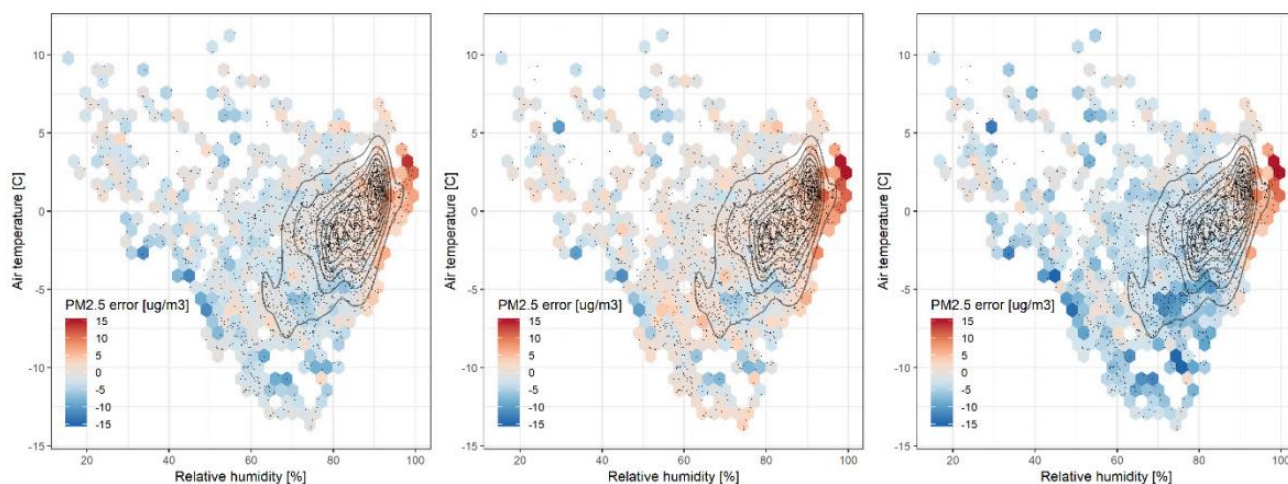
Сензорът за фини прахови частици (ФПЧ) Nova PM SDS011 е реализиран чрез оптично броене на частици с размер от 0.3 до 10 μm в затворена камера и лазерен източник на светлина и принудително движение на въздуха с малък вентилатор с фиксиран дебит. Максималната консумация е 220 *mA* в режим на измерване, и под 3 *mA* в режим на изчакване, при захранващо напрежение 5 V. Работният му режим е от -20 до +50 °C и относителна влажност от 0 до 95%, като при влажност над 70% показанията не могат да бъдат приемани за надеждни поради кондензацията на водни пари в измервателната камера.



Фигура 24 – Измерена зависимост между температура и относителна влажност и грешката в измерване на концентрацията на ФПЧ_{2.5} на сензор Nova SDS011

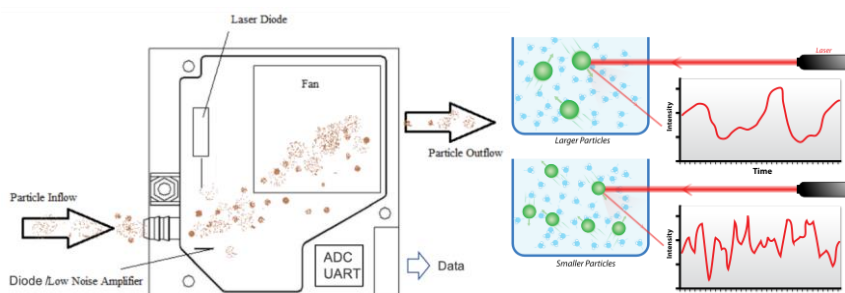
Сверяването на времето се извършва локално или чрез NTP протокол от централизиран сървър (напр. bg.pool.ntp.org)

Сензорът за измерване на eCO_2 и TVOC CCS811 използва hot-plate MOX сензор и отчита наличието на различни летливи оргранични съединения (ЛОС) и позволява получаването на изчислена стойност за еквивалентна концентрация на CO_2 (eCO_2 – Equivalent Carbon Dioxide). Работи с вътрешен модел за eCO_2 и TVOC и позволява динамична адаптация на модела според измерените температура и относителна влажност на въздуха. Консумацията от 26 *mA* при измерване и под 1 *mA* в режим на



Фигура 25 – Наблюдавана грешка на SDS011 сензора при измерване на ФПЧ_{2.5}, представена като измерена – референтна стойност и функция от температурата и относителната влажност на въздуха

От Фигура 24, както и от фигура Фигура 25, се вижда ясно увеличаването на грешката на измерване (цветните шестоъгълници) при повишаване на относителната влажност на въздуха или при понижаване на околната температура.



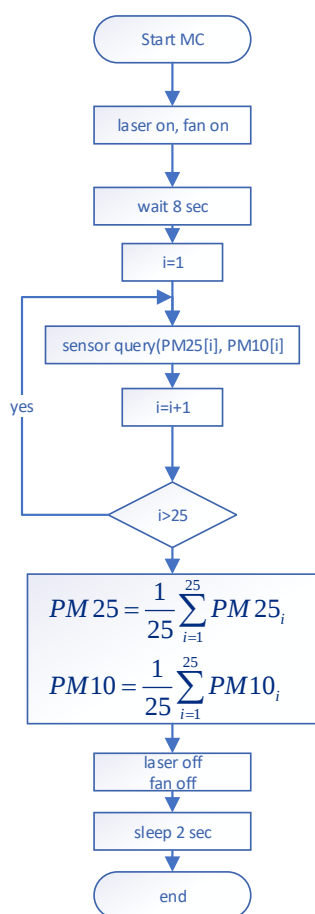
Фигура 26 – Принцип на работа на сензор за ФПЧ Nova SDS011

Измерваните стойности са в границите от 0 до 999 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ за подлежащите на мониторинг фракции ФПЧ_{2.5} (PM_{2.5}) и ФПЧ₁₀ (PM₁₀), като преобразуването от брой измерени частици към масова

концентрация в $\mu\text{g}/\text{m}^3$ се извършва чрез вграден модел в микроконтролера на сензора. Обявената от производителя грешка на измерване е $\pm 15\%$ и $\pm 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Измерването на ФПЧ_{2.5} и ФПЧ₁₀ се извършва на едноминутни цикли, реализирани като 8 секунди продухване на камерата, последвани от 25 последователни измервания, които се осредняват средноаритметично, последвани от 2 секунди пауза.

Продухването на камерата на сензора се извършва, за да се гарантира постъпването на свеж въздух за измерване и отстраняване на кондензат или натрупани груби частици върху излъчващия диод и чувствителния елемент, които биха попречили за броенето на частиците. Последователните измервания позволяват реализирането на алгоритми за филтриране, осредняване или генериране на алармени сигнали. В програмният код е реализирано само намирането на средноаритметична стойност, като оценка на математическото очакване по извадка от 25 измервания на случайната величина. Закръгляването се извършва на основание 10-битовата разделителна способност на АЦП,



Фигура 27 – Блок-схема на функцията за събиране и усредняване на едноминутни данни от сензора за PM_{2.5} и PM₁₀

вграден в сензора (1024 цифрови нива). На Фигура 27 е представена блок-схемата на реализираната функция.

3.2.6. Вътрешен модел на сензора за прах за изчисляване на масовата концентрация в зависимост от преброените частици до определен аеродинамичен диаметър

Получаването на стойностите на *PM25_concentration* и *PM10_concentration* от сензора се извършва чрез измерване широчината на генерираните импулси чрез двоични тригери по всеки от двата канала (P1 за ФПЧ2.5 и P2 за ФПЧ10) за интервала на всяко измерване (1004 msec по времедиаграма, 2000 msec за предаване на данните), след което измерената широчина на импулсите се преизчислява като процент от измереното време. Използват се регресионни модели, описани в статията “Air Quality Sensor Network for Philadelphia”, базирани на редица изследвания за преобразуване на получените стойности в бройна концентрация *ppm* след което - в масова концентрация $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Тук е важно да се отбележи, че до потребителя не достига информация за генерираните импулси или оценената на тяхна база концентрация в *ppm*. Можем да кажем също така, че моделите, по които се извършват трансформациите, не са достъпни до широката публика, но не е невъзможно да бъдат коригирани, оптимизирани или заменени с изцяло нови модели. Преобразуването се извършва в MCU на сензора според текущия *firmware* код в него. Запълването на измервателния интервал (1004 msec по времедиаграма на измервателния цикъл) импулси от каналите за измерване се преобразува в стойност от 0 до 100%, след което се използва регресионния модел за преобразуване в бройна концентрация, *ppm*:

$$PM_{concentration}[ppm] = 1.1 * ratioPM^3 - 3.8 * ratioPM^2 + 520 * ratioPM + 0.62 \quad (\text{III. 2})$$

Следното уравнение се използва за преобразуване на брой преброени частици за 0.01 кубически фута в микрограми за кубичен метър:

$$PM_{concentration} \left[\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \right] = Particle_{Count} * 3541,5 * Particle_{Mass} \quad (\text{III. 3})$$

Реализирани са функции за прочитане на данните от измервателните канали за PM2.5 и PM10 от сензора за фини прахови частици, преобразуването на запълването на измервателния интервал от 2000 msec с отчетени импулси от регистрирани частици във бройна концентрация (*ppm*) и последващата моделна апроксимация на бройната концентрация в масова концентрация ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

3.2.7. Корекционни коефициенти в модела за относителна влажност и дъжд

В състава на фините прахови частици като замърсител на въздуха влизат множество компоненти, включващи киселинни соли (като нитрати и сулфати), органични вещества, метали и техните съединения, твърди почвени частици и частици с друг произход. От тези компоненти повечето са чувствителни към висока относителна влажност или омокряне при дъждовно време. При наличие на висока влажност, частиците поемат вода и увеличават своята маса. Наблюдавана е и съществена разлика между сухи и дъждовни атмосферни условия, което се обяснява с отмиването на част от праховите частици от дъжда. Тъй като въздухът в изследваните помещения трябва да отговаря на задължителни условия за

вентилация и връзка с атмосферата извън сградата, влиянето на промяната в концентрацията на ФПЧ във външния атмосферен въздух е пряко свързано с качеството на въздуха в помещенията. При наличие на измервания за дебита на вентилационната система (или при проветряване на помещенията чрез естествена конвекция през прозорците) към модела за изчисляване на концентрацията на $ФПЧ_{2.5}$ и $ФПЧ_{10}$ могат да бъдат добавени корекционни коефициенти, отчитащи относителната влажност на анализирания въздух и метеорологичните условия (сухо време, дъждовно време), които влияят върху формирането на фините прахови частици.

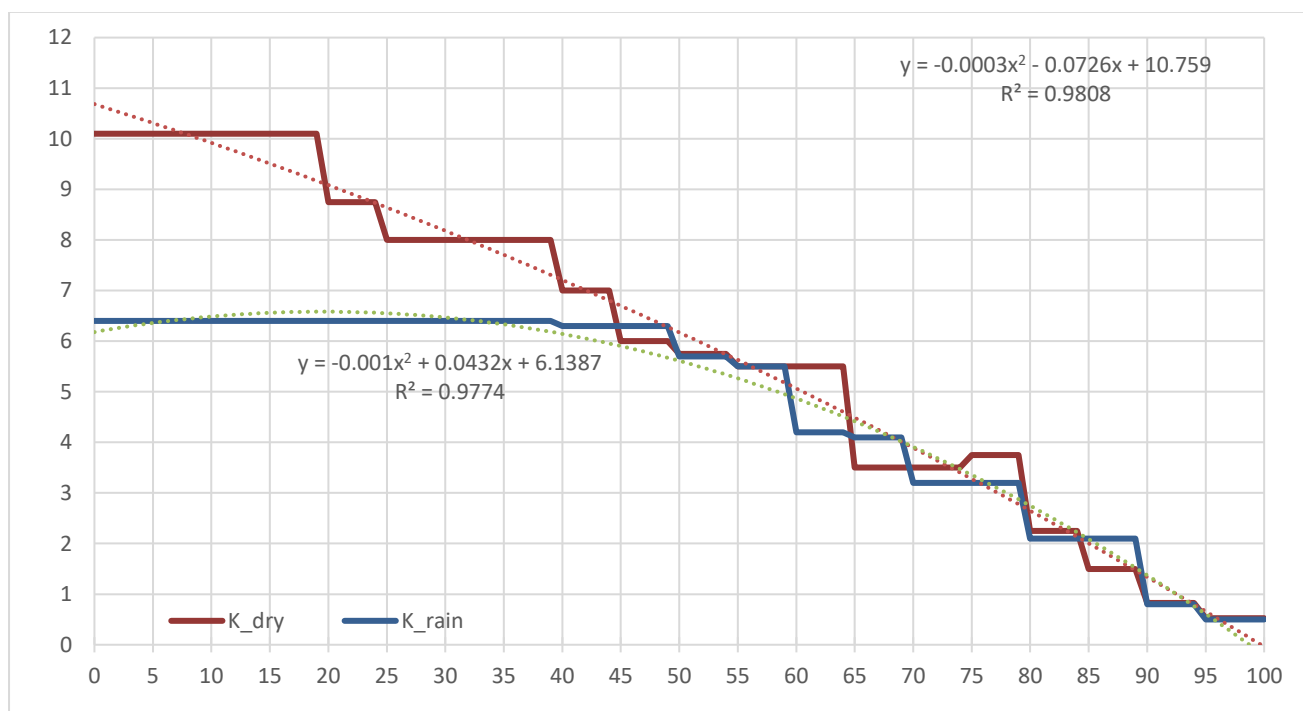
Коригираният модел има следния вид:

$$PM_{concentration} \left[\frac{\mu g}{m^3} \right] = Particle_{count} * 3541,5 * (RH[\%] * K_{weather}) \quad (III. IV)$$

На Фигура 28 са показани корекционните коефициенти K_{dry} за сухо време и K_{rain} за дъждовно време за влиянето на относителната влажност $RH\%$ в интервала от 0 до 100%. Изведени са регресионни модели от втора степен, описващи зависимостта на корекционния коефициент от влажността, които се характеризират с висока стойност на коефициента на множествена корелация R^2 :

$$K_{dry} = -0.003 * RH^2 - 0.0726 * RH + 10.759, R^2 = 0.9808 \quad (III. V)$$

$$K_{rain} = -0.001 * RH^2 + 0.0432 * RH + 6.139, R^2 = 0.9774 \quad (III. VI)$$



Фигура 28 – Корекционен коефициент за влиянието на относителната влажност $RH\%$ за сухо време (K_{dry}) и дъждовно време (K_{rain})

Отчетените и изчислени стойности за бройна концентрация (в ppm) PM_{25_count} и PM_{10_count} и масова концентрация $PM_{25_concentration}$ и $PM_{10_concentration}$ (в $\mu g/m^3$) се използват от мобилната система.

3.2.8. Изчисляване на Air Quality Index (AQI)

За изчисляване на Air Quality Index от получените стойности за $PM_{2.5}$ е реализирана функция на Python. Използват се скалата и границите, дефинирани в стандарт US-EPA 2016, представени в таблица 9:

Таблица 9 – Air Quality Index (AQI) скала според стандарт US-EPA2016

AQI	Ниво на замърсяване на въздуха	Замърсяване на въздуха Категория	Последици за здравето	Препоръчителни предпазни мерки
0 – 50	Ниво 1	Отлично	Няма последици за здравето.	Всеки може да продължи дейностите си на открито нормално.
51 – 100	Ниво 2	Добро	Някои замърсители могат леко да засегнат много малък брой свръхчувствителни индивиди.	Само много малко, свръхчувствителни хора трябва да намалят дейностите на открито.
101 – 150	Ниво 3	Леко замърсен	Здравите хора могат да изпитат леки раздразнения, а по-чувствителните индивиди ще бъдат леко засегнати в по-голяма степен.	Деца, пенсионери и индивиди с респираторни или сърдечни заболявания трябва да намалят продължителни и високоинтензивни упражнения на открито.
151 – 200	Ниво 4	Умерено замърсен	Чувствителните индивиди ще бъдат подложени на по-сериозни влияния. Сърдечно-съдовите и дихателните системи на здравите хора могат да бъдат засегнати.	Деца, възрастните хора и индивидите с респираторни или сърдечни заболявания трябва да избягват продължителни и високоинтензивни упражнения на открито. Общото население трябва умерено да намали дейностите на открито.
201 – 300	Ниво 5	Силно замърсен	Симптоми ще се проявяват често и при здрави хора. Хората с респираторни или сърдечни заболявания ще бъдат значително засегнати и ще изпитат намалена физическа издръжливост.	Деца, пенсионери и индивиди със сърдечни или белодробни заболявания трябва да останат на закрито и да се избягват дейности на открито. Общото население трябва да намали дейностите на открито.
> 300	Ниво 6	Много силно замърсен	Здравите хора ще изпитат намалена физическа издръжливост и може също да проявят забележимо силни симптоми. Други заболявания могат да бъдат предизвикани при здрави хора. Възрастните и болните трябва да останат на закрито и да избягват упражненията. Здравите индивиди трябва да избягват дейности на открито.	Деца, възрастните и болните хора трябва да останат в закрити помещения и да избягват физическото натоварване. Общото население трябва да избягва дейности на открито.

3.2.9. Предаване на измерените данни

Използваният модул SIM900A е произведен от SIMCOM и позволява quad-band 850/900/1800/1900MHz достъп до мрежи на мобилни оператори. Съвместим е с GSM phase 2/2+, GPRS multi-slot class 10/8, GPRS mobile station B, Class 4(2W@ 850/900 MHz), Class 1 (1W@1800/1900MHz), поддържа GSM 07.07&07.05 AT команди, изпращането и получаването на SMS съобщения. Вграденият TCP/UDP стек позволява достъп като клиент до отдалечени сървъри. Захранващото напрежение е от 3.3 до 5V, консумацията в режим на изчакване е 1.5mA, а работната температура от -40 °C до 85 °C. За работата на системата е избран GET метода, тъй като осигурява необходимото ниво на функционалност за работата на разпределената система за мониторинг на условията на жизнената среда в затворени помещения и предаването на измерените параметри чрез GPRS мобилна мрежа или WiFi/Ethernet мрежа към центъра за събиране и обработка на данните. Инициализацията на SIM900A и изпращането на данните през мрежата на мобилен оператор става след конфигуриране на параметрите на Access Point Name (APN) за достъп чрез GPRS свързаност. Като алтернатива може да се използва достъп през WiFi мрежа или през кабелна Ethernet мрежа. Реализиран е достъп до отдалечения сървър чрез W5500 Ethernet модул на Wiznet. W5500 е Ethernet контролер за вграждане и поддържа SPI (Serial Peripheral Interface) за връзка с външни микроконтролери. Поддържа протоколите TCP, UDP, ICMP, IPv4, ARO, IGMP, PPOE и едновременно работи през 8 сокета.

3.3. Експериментално изследване на приложимостта на разпределена система за мониторинг на параметрите на комфорт на жилищна среда в реални условия

Проведено е експериментално изследване на приложимостта и работоспособността на разработената разпределена система в реален обект – детска градина в община Столична, като за целта в една от сградите са инсталирани 4 броя измерващи мобилни станции, предаващи през мобилна мрежа на всеки 15 секунди данни за температура, относителна влажност, концентрация на $\text{ФПЧ}_{2.5}$ и ФПЧ_{10} до централизиран сървър.

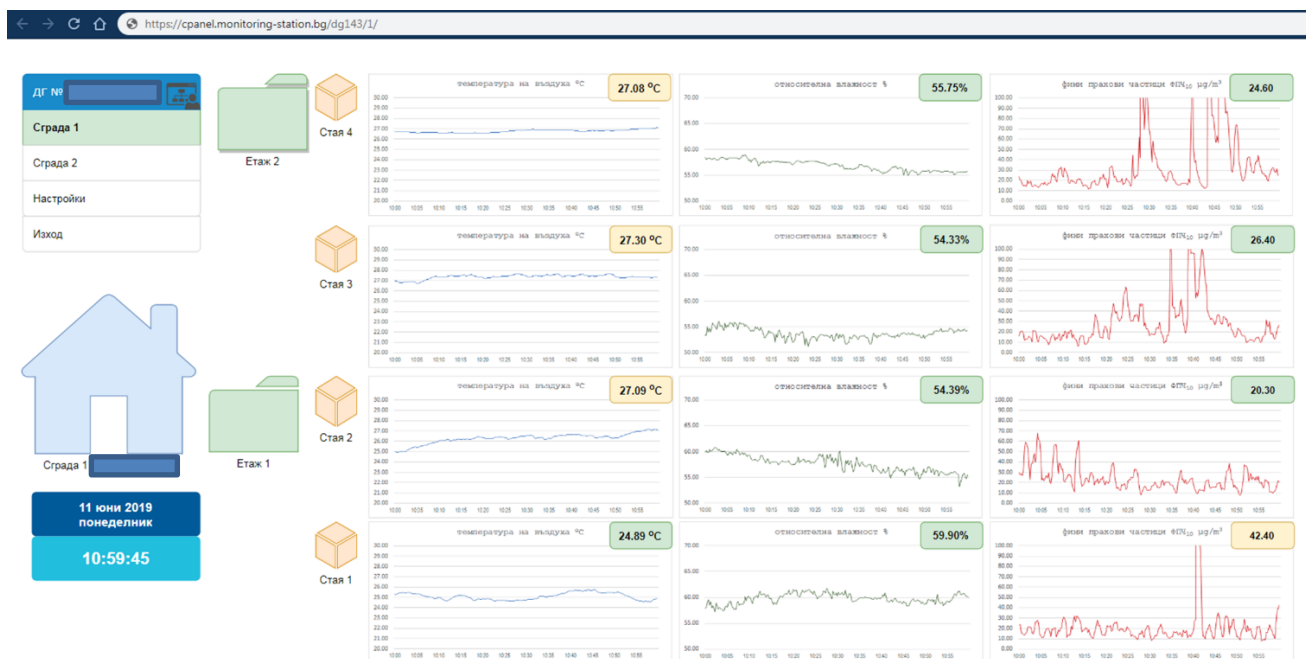
Станциите са монтирани с локално мрежово захранване на височина 1.20 m над пода и са разположени както следва: станция 1 - етаж 1, занималня; станция 2 – етаж 1, спално помещение; станция 3 – етаж 2, занималня; станция 4 – етаж 2, спално помещение. В базата данни са събрани статистически извадки с обем $n=102960$ стойности на всеки един от параметрите, за всяка една от стаите за периода от 08:00 до 19:00 на работните дни от 07.06.2019г. до 31.07.2019г., общо 39 дни.

Обобщените данни показват че, параметрите като температура и относителна влажност се изменят в твърде широки диапазони, което е в разрез с нормативните изисквания за здравословна жизнена среда за деца. Ето защо, една такава система би могла да бъде изключително полезна за създаването и контрола на показателите за качество на жизнената среда в затворени помещения. Аналогичен е извода и за следените параметри $\text{ФПЧ}_{2.5}$ и ФПЧ_{10} – техните стойности нормално се покачват при интензивни занимания с децата и тези пикове могат да бъдат сигнал за проветряване, както и индикация за нивото на хигиената в помещенията.

3.3.1. Наблюдение на състоянието на системата в реално време през Интернет

Разработен е web панел за наблюдение на измерваните параметри в реално време, който в удобен за типичен краен потребител на системата (директор, обслужващ персонал, родители) да представя текущите стойности на измерените параметри и тяхната промяна за избран период (1 час, 1 денонощие, 1 седмица, 1 месец, 1 година). Използвани са програмни езици PHP и JavaScript, както и библиотеките Bootstrap версия 4.3 (<https://getbootstrap.com>) и MDBBootstrap jQuery Pro версия 4.10 (<https://mdbootstrap.com>).

На Фигура 29 е показан панелът, конфигуриран да визуализира данни за последния 1 час за температура, относителна влажност на въздуха и концентрация на фини прахови частици с размер до $10\ \mu\text{m}$. Обновяването на графиките и текущите стойности се извършва автоматично през една минута. Конфигурирането на долна/горна граница за изчертаване на графиките, както и промяната на цвета на индикаторите за текущо състояние на измерваните параметри се извършва от администратор. Изчертават се всички стойности, без да се прилага филтриране или изглаждане.



Фигура 29 – Панел за наблюдение на системата в реално време

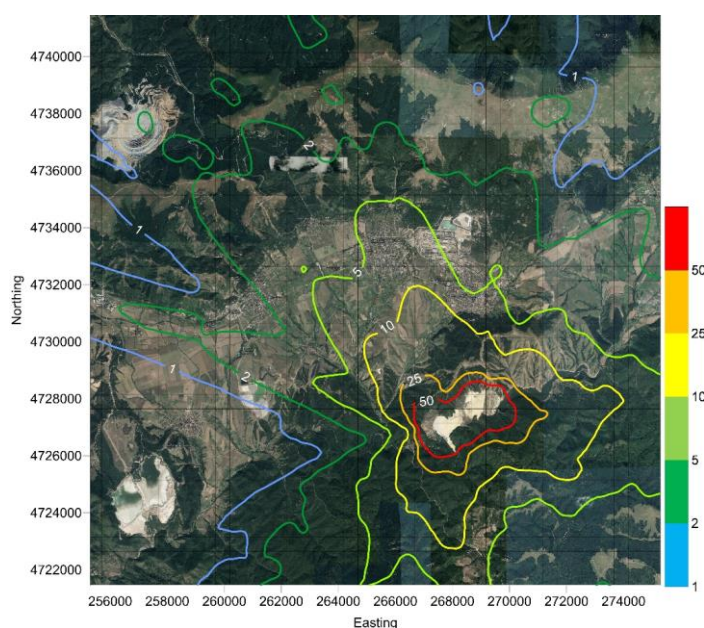
3.4. Изводи

1. Проучени са и са анализирани факторите на жизнена среда в обитаеми затворени помещения, в резултат на което е установено, че:
 - факторите като качеството на въздуха в затворени помещения, температурата и влажността, както и осветеността са от съществено значение за здравето и нормалната работоспособност на засегнатите групи от населението;
 - съществуват нормативни изисквания относно показателите за качество на въздуха и други фактори на жизнената среда, които много рядко се наблюдават комплексно и едновременно, още по-рядко в реално време.
2. Проектирана и изградена е модулна станция за мониторинг на показателите на жизнената среда в затворени обитаеми помещения, с локално архивиране на събраните данни и мрежова свързаност през различна физическа преносна среда – мобилна, кабелна или безжична компютърна мрежа.
3. Проектирана и изградена е разпределена система от модулни станции за мониторинг на показателите на жизнената среда в реално време в комплексни обекти.
4. Проектирана и е създадена Интернет-базирана информационна система с използване на софтуер с отворен код за централизирано събиране, анализ и визуализация на данните от разпределената система от модулни станции.
5. Проведено е експериментално изследване на изградената система в реален обект – детска градина, в резултат на което е установено, че прилагането на такива системи е мощен инструмент за управление и подобряване на качеството на жизнената среда, както и на организацията на работа. Поддържането на много добро качество на жизнената среда е от огромно значение за здравето на чувствителни групи хора, каквито са децата в детските учебни заведения.
6. Системата е с ниска обща себестойност и използва софтуер с отворен код, което я прави достъпна и лесно приложима и особено подходяща за сгради от обществен сектор.

4. МОДУЛНА МОБИЛНА СТАНЦИЯ С АВТОНОМНО ЗАХРАНВАНЕ

4.1. Необходимост от създаване на мобилна автономна система за събиране на метеоданни и мониторинг на замърсителите на въздуха

При оценка на качеството на въздуха чрез моделиране се използват много често модели, нуждаещи се почасови метеорологични данни. Такива са популярните и в България компютърни пакети Breeze AERMOD или AERMOD View. И двата продукта се базират на препоръчвания от US EPA дисперсионен модел AERMOD, като включват предпроцесор за метеорология AERMET, който от своя страна изисква като входни данни два метеорологични файла с определена структура – SFC (surface) и PFL (profile). Такива файлове е възможно да се генерират на базата на метеорологични модели срещу заплащане от НИМХ към БАН. Тук стои въпросът доколко метеорологичните модели (каквито са MM5 моделите) за приземния слой на атмосферата и особено за области с орографски модифициран терен са надеждни. Безспорно наличието на данни, получени чрез реални



Фигура 30 – Стойности на средноденоношната концентрация в приземния слой на атмосферата на ФПЧ_{10} в района на Челопеч, получени с метеоданни от НИМХ при БАН

измервания, би било предимство ако суровите данни могат да бъдат трансформирани бързо, лесно и безплатно в съответните изисквани файлови формати. Това лесно може да бъде демонстрирано при сравнение на розите на вятъра, построени по данни от метеорологичен модел на НИМХ при БАН и по реално измерени данни за същата точка и година.

При сравнението на двете рози е ясно, че преобладаващата посока на вятъра, честотата на вятъра по посоки и процента на тихо време се различават значително. Това води до съществени разлики в изчисляваните концентрации на замърсителите в приземния слой на атмосферата за цялата изследвана област, а от тук и до увеличаване на

грешката на модела.

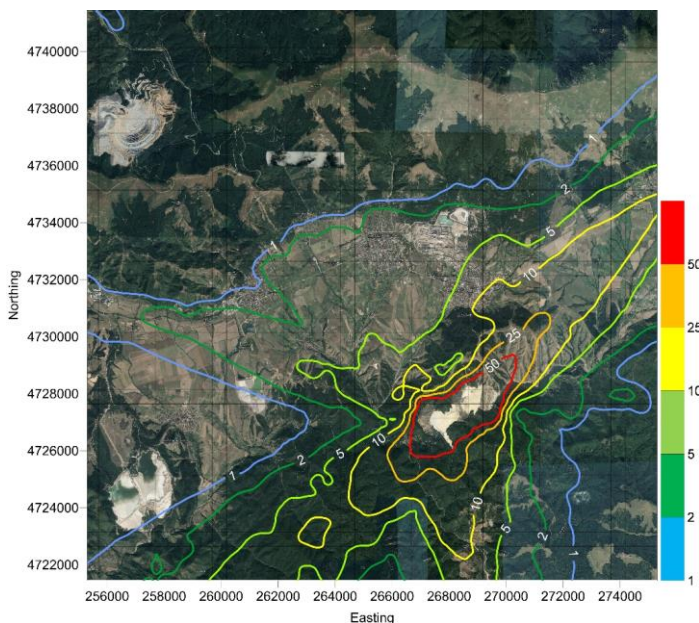
Това особено добре може да се види при сравнението на фигури 30 и 31, на които е представено разпределението на стойностите на средногодишната концентрация на ФПЧ_{10} , емитирани от площен източник в резултат на ветрова ерозия. Двата резултата са получени при еднакви входни параметри. Единствената разлика между двата варианта на тестовия случай са метеоданните, подадени в изисквания от програмния продукт формат. Както се вижда, при случай с емисии, генерирани от вятъра (ветрова ерозия), метеорологичните данни играят още по-голяма роля, тъй като в модела те служат не само за изчисляване на дисперсията на замърсителя, а и за разпределяне на генерираните количества от този тип източници според скоростта на вятъра.

От друга страна в литературата данните за зависимостта на изнасяните от вятъра частици от повърхността на депото, хвостохранилището или друг подобен източник, са силно противоречиви, като според някои емисия се генерира при 19 m/s скорост на вятъра, докато според други скоростта на вятъра, достатъчна за генерирането на значима емисия, е около 5.6 m/s. Генерирането на частици в резултат на ветрова ерозия силно зависи от вида на отпадъка, гранулометричния състав на материала, депониран в съответното хранилище, неговата влажност, склонността му да ерозира в зависимост от атмосферните условия и други параметри на околната среда.

В България няма провеждани изследвания от една страна, а от друга – съществуват множество изоставени хвостохранилища и депа, формирани в резултат на силно развитата металургична и други промишлености в недалечното минало на страната. Тук се добавят източници, имащи същия характер, но образувани в резултат на открит добив (кариери, рудници), депа за строителни и битови отпадъци, както и замърсени почви (без растителност). Особено голям интерес представляват и замърсените пътни настилки и съпътстващата инфраструктура в населените места, тъй като емисията на частици от този тип източници се генерира в непосредствена близост до хората.

От всичко казано до тук е ясно, че разполагането с детайлни и коректно измерени метеорологични параметри е от изключително важно значение за разработването на оценки на качеството на въздуха чрез моделиране, поради което необходимостта от разработване и изграждане на мобилна модулна автономна станция е безспорна. От друга страна същата система би дала възможност за извеждане на специфични вариационни коефициенти, както и емисионни фактори за всеки площен източник на емисии, представляващ научен и практически интерес, тъй като както бе отбелязано по-горе такива изследвания в България не са правени - използват се емисионни фактори, изведени за източници на ветрова ерозия, разположени в САЩ, Канада и Австралия. Ясно е, че условията в България те силно биха се различавали, в резултат на което оценяваните количества на емитираните замърсители са неточни.

Честотата на измерванията чрез сензорна мобилна станция е особено висока (на 15 секунди или по-често), което дава възможност суровите данни да бъдат обработени така, че да се получат свидетелства за действието на един или друг тип източник на замърсяване на въздуха. За целта е необходимо да се комбинират измерванията от няколко вида сензори – температура, относителна влажност, атмосферно налягане, слънцегреене, ФПЧ_{2.5}, ФПЧ₁₀, CO₂, TVOC и др. – чиито данни след обработка могат да служат за регистриране на събития и идентифициране на основния причинител на висока концентрация на замърсител в даден момент. Това е от съществено значение при вземането на управленски административни решения и прилагането на мерки.



Фигура 31 - Стойности на средноденоношната концентрация в приземния слой на атмосферата на ФПЧ₁₀ в района на Чelopeч, получени с измерени метеоданни

4.2. Структура на Surface data file (SFC) и Profile data file (PFL)

Конструирането на тези файлове протича в следните стъпки:

- събиране и компилиране на необходимите метеорологични данни за точката на изследване;
- определяне на параметрите на повърхността (релефа) за точката на изследване;
- оценяване на скаларните параметри;
- оценяване на часовите височини на смесване (височината на граничните слоеве – класа на стабилност и конвективното смесване);
- форматиране на данните в AERMOD съвместим формат.

Изчисляването на необходимите параметри за SFL и PFC файловете се извършва по методиката и формулите съгласно методиките на US EPA.

4.3. Генериране на PFL/SFC файлове от измерената метеорология от мобилните станции

Данните от мобилните метеорологични станции постъпват офлайн във CSV (Comma-separated values) формат или директно онлайн чрез заявки към приемащия сървър. Поради нееднородността на времевите интервали, през които данните биха могли да бъдат измерени или постъпили онлайн, се извършва предварителна обработка в три стъпки и генериране на PFL и SFC файловете в четвъртата стъпка. Чрез SQL заявка данните от изходния CSV файл се импортират в базата данни. Ако се използва онлайн събиране – данните постъпват дистанционно през мрежата. С използване на PHP и SQL заявка се групират измерените стойности по дати и последователни часове за всяка дата. Прочетените часово усреднени данни се записват в нова таблица.

Изчисляване и записване на средната скорост и посока на вятъра

За всеки последователен ден и час се прочитат данните за отделните измервания на посока и скорост на вятъра, като усреднената векторна посока от 0 до 360° за всеки час се изчислява по методологията с отчитане на скоростта на вятъра и преноса на въздушните маси:

$$\begin{aligned} V_{east}[i] &= mean(WS[i] * \sin(WD[i] * \pi/180)) \\ V_{north}[i] &= mean(WS[i] * \cos(WD[i] * \pi/180)) \\ mean_WD &= \arctan2(V_{east}, V_{north}) * 180/\pi \\ mean_WD &= (360 + mean_WD) \% 360 \end{aligned}$$

4.3.1. Генериране на PFL и SFC файлове с изчислените данни

Програмният код е реализиран на скриптов програмен език PHP версия 7.3.8, като генерирането на файловете протича в следните стъпки:

- прочитат се наличните метеорологични данни от базата данни;
- създава необходимата структура за ред от SFC и PFL файловете;
- форматират се полетата според изискванията на метеорологичните процесори, които се използват при последващото моделиране на разпространение на замърсители в атмосферния въздух;
- записват се получените резултати във файлове с необходимата кодировка на символите.

Програмният код е представен в Приложение 4.1.

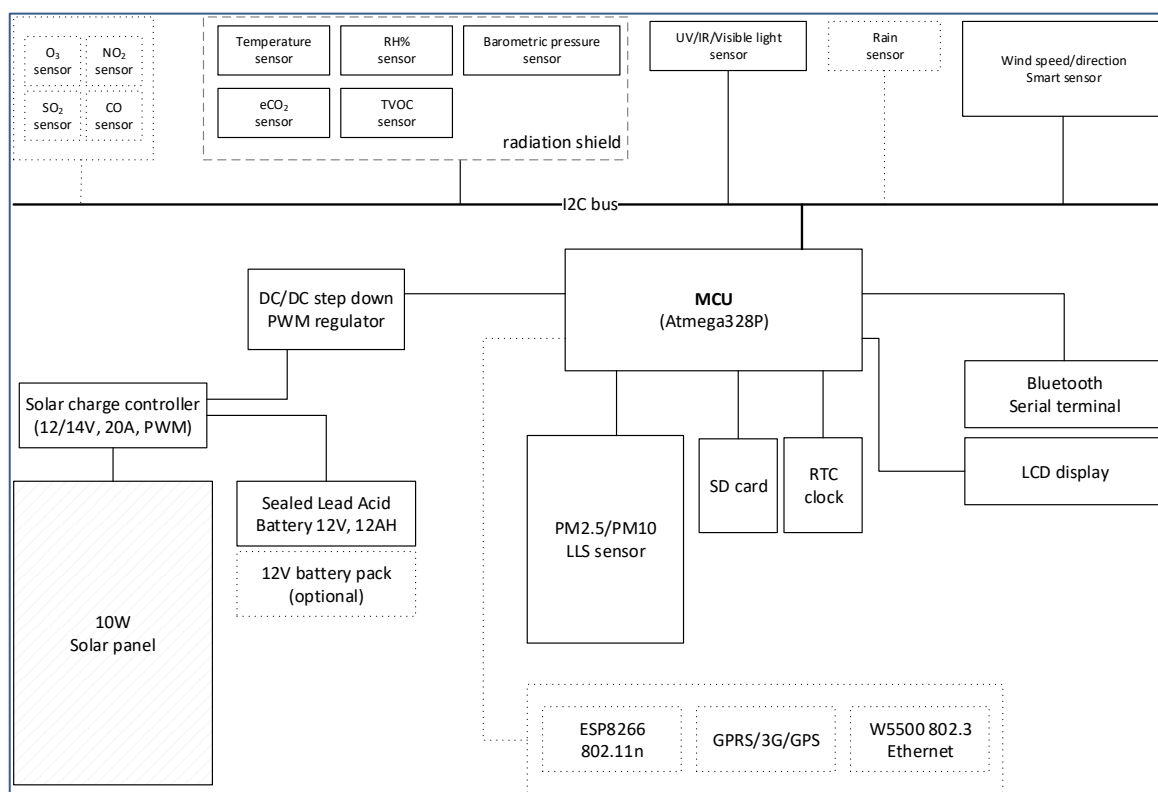
4.4. Проектиране и разработка на мобилната станция

Мобилната станция е разработена на модулен принцип с микроконтролери Atmega328P и ESP8266, като структурата и позволява реконфигурирането и за конкретни

задачи – локално събиране на данни върху SD карта, събиране на данни с предаване на близко разстояние, събиране на данни с предаване през мобилна или компютърна мрежа; измерване, събиране и първична обработка на данни за метеорологични параметри – температура на въздуха, относителна въздушна влажност, атмосферно налягане, скорост и посока на вятъра, количество валежи, параметри на слънцегреенето – UV индекс, UV/IR/видима светлина; измерване, събиране и първична обработка на данни за замърсители на въздуха – eCO₂, TVOC, NO₂, SO₂, CO и други.

4.4.1. Принципна схема

Принципната схема е показана на Фигура 32 и включва следните основни компоненти: соларен панел, соларен контролер, акумулатор/акумулаторен пакет; понижаващ PWM DC/DC за захранване на микроконтролерите; микроконтролер Atmega328P, и опционален микроконтролер ESP8266; метеорологични измервателни сензори; измервателни сензори за замърсители; SD картков модул за локално съхранение на данните; мрежови комуникационни модули.



Фигура 32 – Принципна схема на модулната мобилна станция с автономно захранване

4.4.2. Компоненти на станцията

В дисертационния труд са описани отделните компоненти на модулната станция, като следва да се отбележи, че към нея по наличните входно/изходни интерфейси и шини могат да бъдат добавяни най-различни допълнителни сензори според нуждите на конкретната изследователска задача (например сензори за измерване на концентрацията на SO₂, NO₂, O₃ и CO във въздуха, които са общи замърсители според директива 2008/50/ЕС). Автономното захранване от соларен източник (панел) или химически източник на енергия (Pb или LiIon акумулатори) осигурява възможността за работа при специфични местоположения, разположени далеч от електропреносната мрежа. Реализиран е програмен код, инициализиращ работата на модулите и събирането на данните, представен в Приложение 4.2. За работата на свързания към станцията смарт сензор за вятър е реализиран програмен код, представен в Приложение 4.3. За инициализацията на HM12 bluetooth комуникационния модул е реализиран програмен код, представен в Приложение 4.4.

4.4.3. Програмен код за реализация на Exponential Moving Average (ЕМА) алгоритъм

Изглаждането на входните данни, четени с висока честота от измервателните сензори позволява елиминирането на високочестотните смущения в сигнала. Те могат да се дължат на външни смущения или на алгоритмите за преобразуване на напрежението в цифров еквивалент в 10-битовите АЦП на микроконтролера. Алгоритъмът с използване на експоненциално претеглено пълзящо средно (ЕМА) за изчисляване на изгладена стойност на входния сигнал S_i при стойности на входния сигнал Y_i :

$$t = 1, S_1 = Y_1 \quad (IV. 1)$$

$$t > 1, S_t = \alpha * Y_t + (1 - \alpha) * S_{t-1} \quad (IV. 2)$$

Където S_t е изчисленият сигнал от ЕМА алгоритъма за време t , α е коефициент в интервала $[0; 1]$, който определя тежестта на предишните изчислени стойности на сигнала. Висока стойност на α води до по-бърза реакция на промяна на входния сигнал, но използва по-малко сурови входни данни от сензора. Изчисляването на α може да се извърши при желана честота на срязване (cut-off frequency) на low-pass филтъра, реализиран от ЕМА:

$$y[n] = (1 - \alpha) * [n - 1] + \alpha x[n] \quad (IV. 3)$$

където $x[n]$ са входните данни, а $y[n]$ са изчислените стойности от ЕМА. След прилагане на z-трансформацията се получава:

$$Y(z) = (1 - \alpha)z^{-1}Y(z) + \alpha X(z) \quad (IV. 4)$$

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{\alpha}{1 - (1 - \alpha)z^{-1}} \quad (IV. 5)$$

За нормализирана дискретна радиална честота $\Omega [0, \pi]$

$$|H(z = e^{-i\Omega_{3dB}})|^2 = \frac{1}{2} = \left| \frac{\alpha}{1 - (1 - \alpha)e^{-i\Omega_{3dB}}} \right|^2 = \frac{\alpha^2}{|1 - (1 - \alpha)\cos(-\Omega_{3dB}) - j(1 - \alpha)\sin(-\Omega_{3dB})|^2} \quad (IV. 6)$$

От където се получава

$$[1 - (1 - \alpha)\cos(\Omega_{3dB})]^2 + [(1 - \alpha)\sin(\Omega_{3dB})]^2 = 2\alpha^2 \quad (IV. 7)$$

$$\alpha^2 + 2(1 - \cos(\Omega_{3dB}))\alpha - 2(1 - \cos(\Omega_{3dB})) = 0 \quad (IV. 8)$$

с решения

$$\alpha = \cos(\Omega_{3dB}) - 1 \pm \sqrt{\cos^2(\Omega_{3dB}) - 4\cos(\Omega_{3dB}) + 3} \quad (IV. 9)$$

от които само положителното решение може да даде положителна стойност на α .

Като използваме това решение на уравнението за α и зависимостта

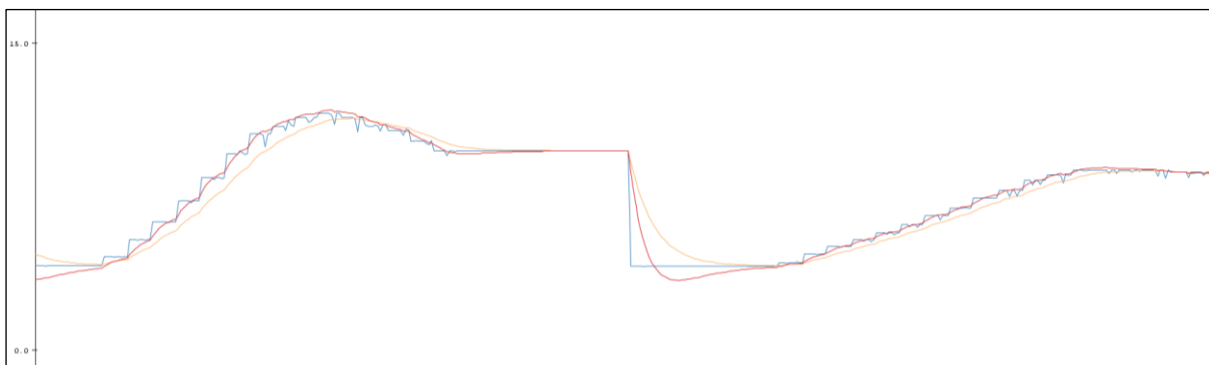
$$\Omega_{3dB} = \frac{\pi}{F_s/2} f_{3dB} \quad (IV. 10)$$

можем успешно да определим α при зададени f_{3dB} и F_s

Алгоритъмът за изглаждане на данните с използване на двойно експоненциално претеглено пълзящо средно е предложен през 1994 година от Patrick G. Mulloy в списанието Technical Analysis of Stocks & Commodities като ефективен метод за изглаждане на данните с намаляване на закъснението при отразяване на бързи промени във входните данни:

$$DEMA = 2 * EMA - EMA(EMA) \quad (IV. 11)$$

На алгоритъма са му необходими $2 * period - 1$ данни, за да генерира изгладена стойност. На Фигура 33 е показано действието на DEMA филтър (в червено), сравнено с ЕМА филтър (оранжево) и директно записания сигнал от сензора (синьо).



Фигура 33 – Сравнение между необработени входни данни, ЕМА и DEMA изглаждане

В рамките на дисертационния труд са създадени програмни кодове, реализиращи ЕМА, DEMA, ТЕМА, high-pass филтриране на входния сигнал, band-pass филтриране на входния сигнал и band-stop филтриране на входния сигнал.

4.5. Експериментално изследване на приложимостта на мобилната станция при неблагоприятни метеорологични условия

Тъй като по информация на производителите повечето от сензорите, използвани за разработването на мобилната модулна станция са приложими за условията на затворени помещения или заслони и не са били тествани на открито, а още повече при зимни условия – ниски температури, висока влажност, снеговалеж, мъгла и др., безспорно е необходимо да се проведат тестове за поведението на апаратурата в реални неблагоприятни метеорологични условия.

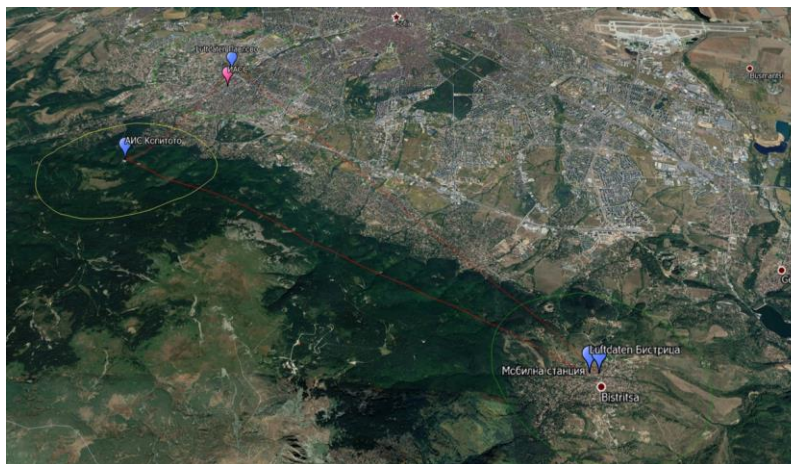
За целта е избран времеви период от 28.12.2019 г. до 4.1.2020г. включително. Станцията е разположена на надморска височина от 902м. в с. Бистрица – община Столична, в точка с географски координати 42.58791N и 23.36016E, в жилищна зона. Мястото се характеризира със сложна топография, която обуславя локални завихряния на вятъра, както и локален микроклимат. Зоната е жилищна, без натоварен автомобилен трафик. Населението се отоплява с преобладаващо използване на инсталации на твърдо гориво. Няма промишлени или източници от ветрова ерозия наблизо. Това дава възможност при регистриране на пикове на замърсяване с ФПЧ ясно да се идентифицира вида на източника на замърсяване след комбиниран анализ на данните от различните сензори.

Паралелно е проведен пробонабор върху стъклофибърни филтри със стандартна апаратура за гравиметрично определяне на ФПЧ₁₀, разположена непосредствено до мобилната станция с цел евентуална корекция или извеждане на нов вътрешен модел за преобразуване на данните от LLS брояча на частици в масова концентрация.

За сравнение на пригодността, влиянието на микроклимата и вида на замърсяващите дейности е направен сравнителен анализ на данните от експерименталната мобилна модулна станция, и по конкретно на сензорите за температура, влажност на въздуха и ФПЧ, с тези на публичната мрежа на проекта Luftdaten.info (познати под името AirSofia или AirTube), както и с данни от пункт за мониторинг на въздуха на Изпълнителна агенция по околна среда (ИАОС) – „АИС Копитото“, използващ референтен метод за мониторинг (бета абсорбция).

4.5.1. Географско разположение на мониторинговите станции

Разположението на избраните станции за мониторинг на качеството на атмосферния въздух е представено на Фигура . Както се вижда от Фигура , АИС Копитото е разположена в извънградски район, в близост до град София и се класифицира като извънградски фонов пункт за мониторинг на КАВ. За него е характерно регистрирането на фоновото замърсяване с ФПЧ_{10} и данните от станцията са използват за проверка на изводите от анализа на данните от сензорните станции.



Фигура 34 – Разположение на станциите за мониторинг на КАВ

Сензорна станция „Павлово №11877“ е част от проекта Luftdaten.info (AirSofia) и е разположена в близост до две големи пътни артерии – бул. “Цар Борис III” и бул. „Овча купел“. Ето защо се предполага, че отчита основно влиянието на емисиите на $\text{ФПЧ}_{2.5}$ и ФПЧ_{10} формирани от транспортните средства по двата булеварда. Очаква се и съотношението $\text{ФПЧ}_{2.5}/\text{ФПЧ}_{10}$ да бъде различно от това в фоновите пунктове. Сензорна станция „Бистрица №6394“ също е част от проекта Luftdaten.info (AirSofia) и е разположена на около 150 метра от местоположението на експерименталната мобилна станция, обект на дисертацията. Избрана е поради близкото разположение до мястото на експеримента от една страна и от друга – разположението и е в гранична зона, в края на жилищния район, в подножието на планината, където са характерни сравнително постоянни вертикални течения. Всички сензорни станции, включени в проекта Luftdaten.info събират данни през приблизително 2:30 минути, докато мобилната модулна станции е конфигурирана да измерва и записва резултати за показатели на качеството на въздуха и метеоданни през 15 секунди (4 измервания в минута). Това дава възможност за регистриране на пикови стойности на концентрацията на замърсителите, дължащи се на бързо протичащи преходни събития (залпови замърсявания).

4.5.2. Резултати от проведените експерименти

Измерени средноденонощни концентрации на ФПЧ_{10} с гравиметричен метод

В Таблица 9 са представени измерените средноденонощни концентрации на ФПЧ_{10} с използване на гравиметричен метод и апаратура. Всички опити от №1 до №7 са с продължителност 24 часа или т.нар. ръчен пробонабор на проби от въздуха върху филтри. Стандартните 47 mm стъклофибърни филтри са темперирани при 25 °C и 50% относителна влажност в лабораторни условия, след което на микроаналитична лабораторна везна е измерено теглото на празната проба. След приключване на пробонабора и лабораторно темперирание при същите условия, филтрите са премерени на същата везна и разликата в теглото разделена на определения с дебитомера преминал въздух през филтъра в m^3 определя изчислената масова концентрация в $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Таблица 9 – Резултати от 24-часов ръчен пробонабор с гравиметрична апаратура

№	начало дата	край дата	въздух V, m ³	концентрация µg/m ³	% от СДН (50 µg/m ³)	забележка
1	28.12.2019	29.12.2019	68.61	0.73	1.5	снеговалеж; слаб вятър; субективно чист въздух; битово;
2	29.12.2019	30.12.2019	68.40	6.73	13.5	облачно; тихо; субективно чист въздух; битово;
3	30.12.2019	31.12.2019	66.17	33.85	67.7	ясно; тихо; субективно чист въздух; битово;
4	31.12.2019	1.1.2020	66.91	179.94	359.9	облачно; тихо; субективно леко замърсен въздух; битово; фойерверки и пиратки;
5	1.1.2020	2.1.2020	65.73	44.58	89.2	ясно; тихо; субективно леко замърсен въздух; битово;
6	2.1.2020	3.1.2020	64.86	11.76	23.5	ясно; тихо; субективно леко замърсен въздух; битово;
7	3.1.2020	4.1.2020	64.78	1.85	3.7	ясно; тихо; субективно леко замърсен въздух; битово;

В полето „Забележки“ са отчетени специфичните метеорологични условия, при които е събрана съответната проба. Проба №4 от 31.12.2019 година се отличава значително от останалите по измерената висока стойност на събрани замърсители, което може да бъде обяснено с натрупването на тежки частици от метални соли или оксиди (алуминиеви, магнезиеви, стронциеви, бариеви, калиеви и др.) в следствие на новогодишните фойерверки в близост до точката на измерване. Оптически (видимо с просто око) филтърът от проба №4 не се отличава съществено от проби №3 и №5, отговарящи на много по-ниска концентрация на ФПЧ₁₀. Следва да се отбележи, че това е референтния метод за калибриране на всички останали методи за директно и индиректно измерване на масова концентрация (европейския стандарт EN12341).

Обобщени резултати от мобилната станция

В таблица 11 са представени обобщените резултати от работата на мобилната измервателна станция за периода от 28.12.2019г. до 04.01.2020г. включително (8 денонощия). Събрани са извадки с обем n=23831 стойности на параметрите T (температура на въздуха, °C), AP (атмосферно налягане, hPa), RH (относителна влажност, %), DP (изчислена точка на оросяване, °C), UV (UV индекс на слънцегреене), eCO₂ (концентрация на еквивалентен CO₂, ppm), TVOC (обща летливи органични съединения, ppb). За параметрите PM_{2.5} (ФПЧ_{2.5}, µg/m³) и PM₁₀ (ФПЧ₁₀, µg/m³) обемът на извадката е редуциран с 2706 стойности до n=21125 поради замръзване на вентилатора на сензора от кондензирали водни капки и спадане на температурата под -8.8 °C. Коририган е алгоритъма на програмата с промяна на режима на продухване преди/след измерване за отстраняване на проблема.

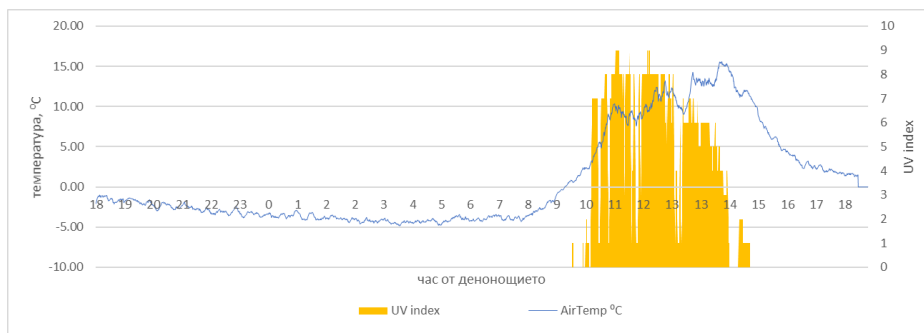
Таблица 10 – Резултати от работата на мобилната модулна станция

Параметър	Мерна единица	N	N*	Avg	Min	Max	StDev
T	°C	23831	0	0.62	-8.87	17.62	4.79
AP	hPa	23831	0	922.15	914.92	926.89	3.18
RH	%	23830	0	60.25	20.63	79.45	12.60
DP	°C	23830	0	-6.64	-13.06	-2.16	1.95
UV	index	23831	0	0.6	0.0	9.0	1.89
PM _{2.5}	µg/m ³	21125	2706	33.63	0.40	876.20	52.34
PM ₁₀	µg/m ³	21125	2706	84.83	0.90	1893.10	131.82
eCO ₂	ppm	23831	0	861.80	0.00	7992.00	676.99
TVOC	ppb	23831	0	69.86	0.00	1156.00	103.14

п=21125 поради замръзване на вентилатора на сензора от кондензирали водни капки и спадане на температурата под -8.8 °C. Коририган е алгоритъма на програмата с промяна на режима на продухване преди/след измерване за отстраняване на проблема.

Статистически анализ на получените резултати

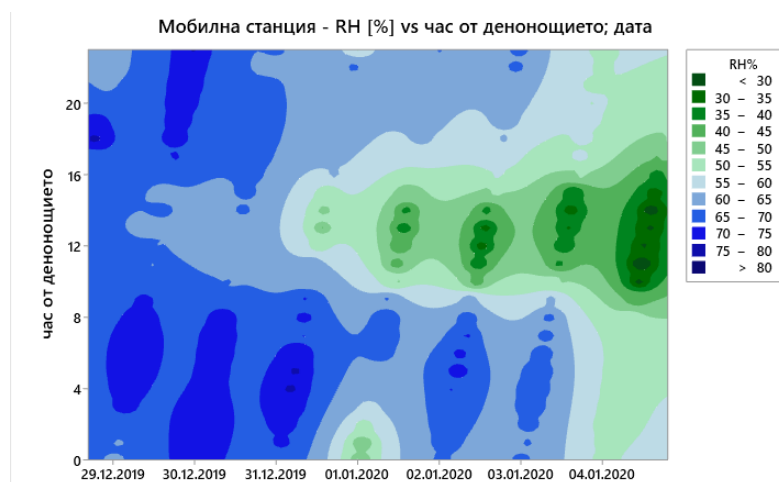
За периода от 01.01.2020 до 04.01.2020г. в часовете от 10 до 15 температурата на въздуха е в диапазона от 5 до 15 °С, което е необичайно висока температура за това време на годината. Това особено добре личи на от графиката на Фигура 35, където са показани



дневното изменение на температурата и измерения UV индекс за 02.01.2020г., а от тук следва да се очакват и по-ниски емисии в резултат на горивните процеси за отопление.

Фигура 35 – Измерена температура и UV индекс (02.01.2020г.)

На Фигура може да се види измерената относителна въздушна влажност RH в % за периода на експеримента. Лесно може да се забележи понижаването на относителната

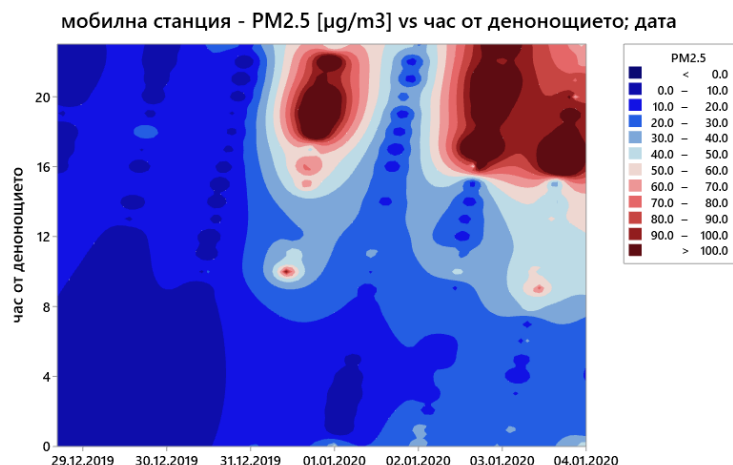


Фигура 36 – Измерена относителна влажност на въздуха [%] по дни и часове

влажност в периодите с по-висока температура от Фигура 35. На следващата фигура са представени контурите на измерените стойности на абсолютното атмосферно налягане в hPa, където се забелязват в началото на периода области с ниско атмосферно налягане в късните часове на денонощието, съвпадащи със слабия снеговалеж през този период.

На Фигура са представени измерените с мобилната станция стойности

на концентрацията на ФПЧ_{2.5}, по формата на контури в зависимост от деня и часа от денонощието. И от двете фигури ясно се забелязват пиковите стойности на концентрацията на този замърсител. Областите с червени контури са в часовете, характерни за разпалване на отоплителните инсталации на твърдо гориво (сутрин между 8 и 9 часа). По-големите области, оградени с червен цвят, се получават за вечерните часове (след 16:30 часа), които съответстват на спада на дневната температура и свързаното с това интензивно отопление. Процесът се запазва стабилен за няколко часа, с почти постоянна емисия.



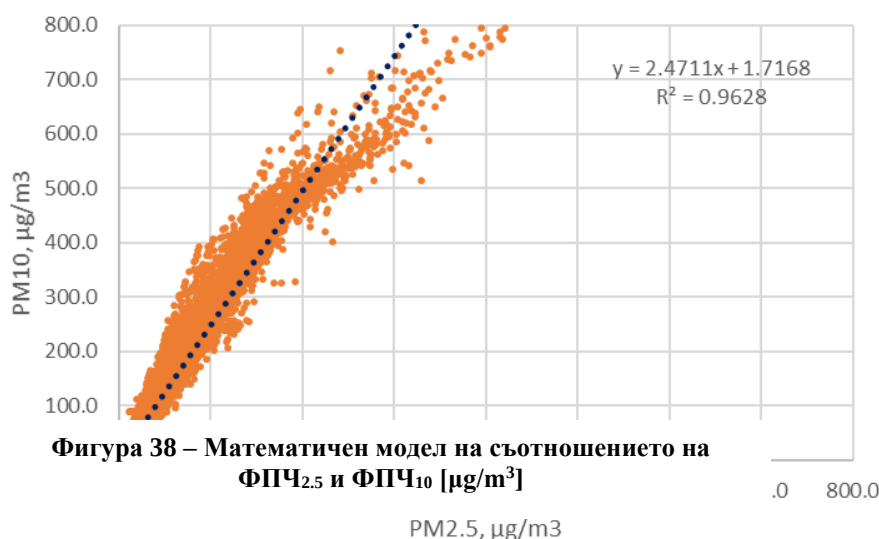
Фигура 37 – Измерена концентрация на ФПЧ_{2.5} [µg/m³] по дни и часове

В дисертационни труд са представени резултати за ФПЧ_{10} , аналогични на тези, представящи данните за $\text{ФПЧ}_{2.5}$, тъй като фракцията до $10\ \mu\text{m}$ включва в себе си и фракцията до $2.5\ \mu\text{m}$. Тук трябва да бъде отбелязано, че количествата на по-едрата фракция ФПЧ са по-големи когато частиците се генерират при изгаряне на твърдо гориво за отопление, което може да се забележи от червения контур на графиката, който е значително голям по площ и по стойност.

Освен това характерни области с краткотрайни пикови стойности на концентрацията се забелязват всяка сутрин между 8 и 9 часа, което се обяснява с часовете на стартово запалване на отоплителните инсталации. Това е изключително важно, тъй като е ясен сигнал за идентифициране на събитие и тип замърсяваща дейност, особено в комбинация с данните от другите два сензора – за eCO_2 и TVOC

От друга страна, графиките ясно показват вариацията на концентрацията, а от там и на емисията на ФПЧ , както средноденоношно, така и според дневната температура, което е от съществено значение за получаването на адекватни и точни вариационни коефициенти, използвани при дефиниране на емисията за целите на оценката на КАВ чрез моделиране.

На Фигура 38 е представен регресионен модел на съотношението между концентрациите на $\text{ФПЧ}_{2.5}$ и ФПЧ_{10} , с висока стойност на коефициента на детерминация.



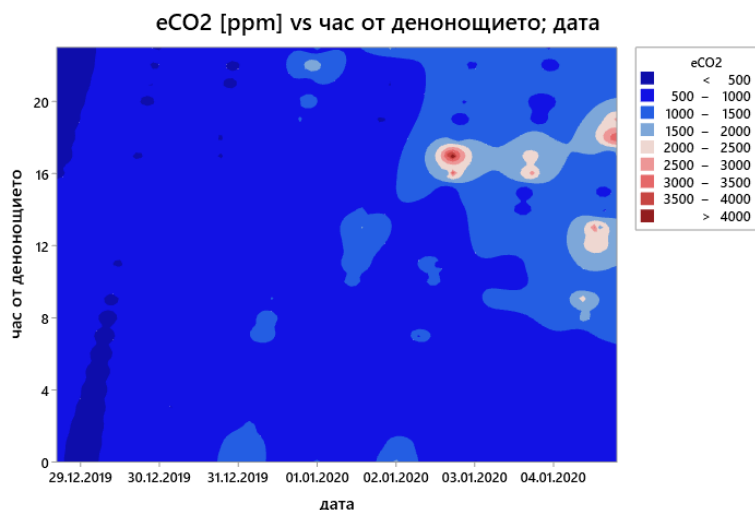
Фигура 38 – Математичен модел на съотношението на $\text{ФПЧ}_{2.5}$ и ФПЧ_{10} [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

Ясно се забелязва, че при високите стойности на концентрацията на двете фракции на частиците се появява отчетлива нелинейност на съотношението, изразяваща се в нарастване на пропорцията на фракцията до $2.5\ \mu\text{m}$.

Това би могло да се дължи на погрешното измерване чрез LLS метода, повлияно от ядрата на кондензация при висока относителна влажност на въздуха (над препоръчваната от производителя горна граница от 75%).

От друга страна, линейния регресионен модел $y=b_0 + b_1x$ от първи ред не отнема значими изчислителни ресурси и време, поради което може да се използва в плаващ времеви прозорец за анализ на промяната на коефициентите b_0 и b_1 , които са допълнителен индикатор за вида на източника на замърсяване и неговото местоположение в комбинация с измерените стойности за посока и скорост на вятъра.

На Фигура е представена изменението на измерената концентрация на eCO_2 по дни и часове



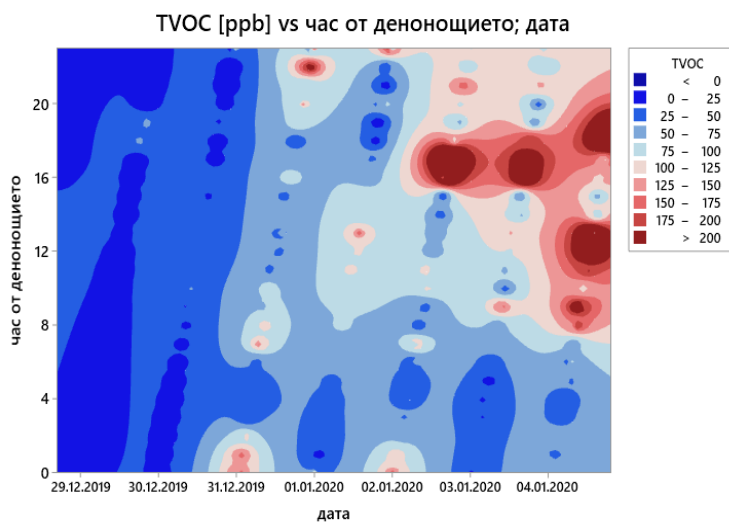
Фигура 39 - Измерена концентрация на eCO_2 [ppm] по дни и часове

от мобилната станция за периода от 28 декември 2019г. до 4 януари 2020г. Както бе споменато по-горе, комбинираният анализ на данните за концентрацията на $ФПЧ_{2.5}$ и $ФПЧ_{10}$ и eCO_2 дава ясна представа за източника на замърсяване.

На Фигура е представено разпределението на стойностите на концентрация на общи летливи

органични съединения (TVOC) в ppb, измерени от мобилната станция. Тук областите с по-високи стойности на концентрацията на ОЛОС съвпадат по място с тези на eCO_2 , но се характеризират с по-голяма продължителност поради факта, че в горивните инсталации в населеното място на провеждане на експеримента се използват пелети, дърва и въглища с различно влагосъдържание, нуждаещи се от период на изсушаване, при което се отделят ЛОС. Тъй като дървесината е с по-високо влагосъдържание от пелетите, широчината на тези области може да се използва като характеристика за идентифициране на вида на горивото за отопление.

За целта е необходимо да се проведат допълнителни експерименти за стандартизиране на широчината на тези области в зависимост от вида на използваното гориво и метеорологичните условия.



Фигура 40 - Измерена концентрация на TVOC [ppb] по дни и часове

Влиянието на скоростта на вятъра и относителната влажност ясно личи при сравнението данните $ФПЧ_{2.5}$ скоростта на вятъра. Така например, на 31.12.2019 г. се откроява област с по-висока концентрация на $ФПЧ$ до $2.5\mu m$ за часовете от 14 до 22 ч. За същия ден в предходните часове скоростта на вятъра е била ниска, а относителната влажност — висока, което е предпоставка за натрупване на замърсители в приземния слой на атмосферата, въпреки интензивното слънчево греење.

С други думи, влиянието на метеорологичните параметри се характеризира с известно закъснение във времето. Това налага метеорологичните параметри да се разглеждат комбинирано при оценката на зависимостта от тях.

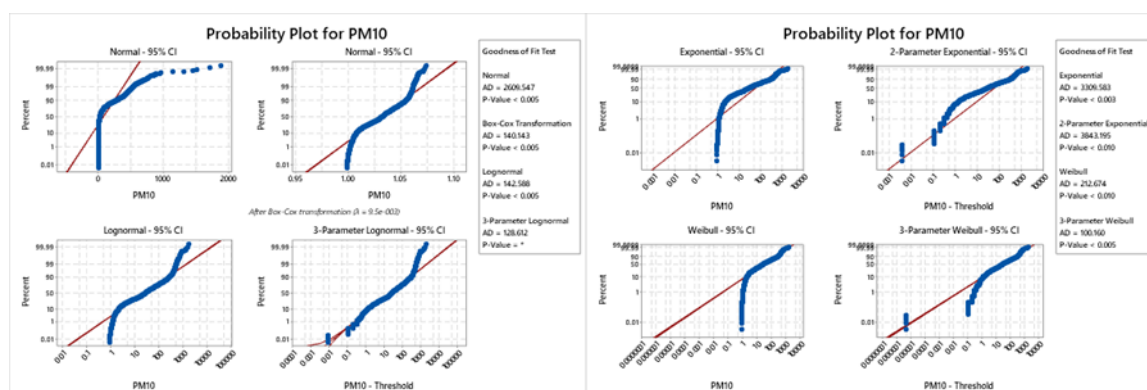
В дисертацията са представени за сравнение графики за измерените стойности за температура, относителна влажност и концентрация на $ФПЧ_{10}$ и в допълнение са изчертани

хистограми на разпределението на концентрацията на ФПЧ_{10} с апроксимирано разпределение на Weibull и са определени неговите параметри.

За сравнение на измерените стойности на измерените показатели – температура, относителна влажност и концентрация на ФПЧ_{10} , както и хистограмата за разпределени на стойностите на концентрацията на ФПЧ_{10} с апроксимирано разпределение на Weibull, в дисертацията са представени същите графики, построени по данни от АИС „Копитото“ на ИАОС. Тук трябва да се отбележи, че данните от тази мониторингова станция се записват като средночасови стойности, следователно те са с много по-ниска разделителна способност от сензорните станции на проекта Luftdaten.info, още повече от мобилната модулна станция, което затруднява сравнението от една страна, и затруднява силно идентифицирането на произхода на замърсяването, но все пак се наблюдават области с характерно залпово замърсяване, като например това в новогодишната нощ на 31 декември 2019г срещу 1 януари 2020г. Хронологично, разбира се, по-високите стойности на концентрацията се отчитат в АИС „Копитото“ няколко часа по-късно поради отдалеченото разположение на станцията от източниците на замърсяване.

От всичко казано до тук следва, че при подходяща подредба на модулните станции в една сензорна мрежа, могат да бъдат установявани в реално време и отдалечени източници на замърсяване, както и да бъде идентифициран произхода на замърсителите.

От проведения корелационен анализ в дисертацията има признаци за наличие на нелинейност, което от своя страна е предпоставка за използване на модели, описващи нелинейни процеси.



Проведените тестове с Minitab за определяне на вида на статистическото разпределение, което най-добре описва поведението на измерените концентрации на ФПЧ_{10} от мобилната станция, ясно показват силна нелинейност и неприложимостта на нормалното разпределение и свързаните с него методи за оценяване на груби грешки и филтрирането им по правилото на трите сигми, което е стандартната практика в България и ЕС. Това налага търсенето на модели и подходи за описание на разпределението на стойностите на концентрацията на $\text{ФПЧ}_{2.5}$, ФПЧ_{10} , както и на други замърсители със открити нелинейности в поведението.

4.5.3. Математични модели на концентрацията на ФПЧ_{10}

В литературата са описани различни видове статистически модели за предсказване на концентрацията на фини прахови частици в атмосферния въздух. Тук трябва да отбележим, че с бурното развитие на изчислителната техника през последните години и все по-голямата достъпност на широката научна общност до изчислителни системи с висока производителност, стана възможно прилагането на съвременни подходи и статистически

методи при обработката на големи обеми от данни за множество едновременно измервани параметри на околната среда и качеството на атмосферния въздух, с които неизбежно е свързано краткосрочното, средносрочното и дългосрочното прогнозиране на концентрациите на замърсители.

Такива съвременни подходи са:

- многофакторни нелинейни регресионни модели;
- Бокс-Дженкинс ARIMA (Auto Regression Integrated Moving Average) модели;
- ARMA/ARIMA модели;
- Уейвлет (wavelet) декомпозиция на входните данни и ARMA/ARIMA модели;
- хибридни модели с използване на ARIMA и невронни мрежи.

На базата на корелационния анализ са определени за значимо влияещи върху масовата концентрация на ФПЧ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ входни променливи: x_1 {температура, $^{\circ}\text{C}$ }, x_2 {относителна влажност, %}, x_3 {слънцегреење чрез UV index, W/m^2 }, x_4 {скорост на вятъра, m/s }. Връзката $C = f(x_1, x_2, x_3, x_4)$ може да бъде описана с различни математични модели, чиято способност да предсказват краткосрочно да бъде оценена чрез изчисляване и сравняване на различни статистически критерии, като MAE, MBE, RE, RMSE, NRMSE и др.

Модел 1 – MNR модел

Според Shi and Harrison, 1997 връзката между концентрацията на фините прахови частици и избраните входни фактори може да бъде изразена като:

$$C_{\text{ФПЧ}_{10}} = e^{B_0} \cdot X_1^{B_1} \cdot X_2^{B_2} \cdot X_3^{B_3} \cdot X_4^{B_4} \quad (\text{IV. 18})$$

$$\ln(C_{\text{ФПЧ}_{10}})_i = B_0 + B_1 \ln X_1 + B_2 \ln X_2 + B_3 \ln X_3 + B_4 \ln X_4 \quad (\text{IV. 19})$$

Модел 2 – Box-Jenkins ARIMA модел

Прогнозирането на времевите редове се използва за декомпозиране на данните за търсенето на техните основни компоненти, след което тяхното историческо развитие се проектира в бъдещето. Класически подход при анализа на времеви редове е Бокс-Дженкинс ARIMA моделът, при който се извършва прогнозиране на данни на базата на вече наблюдаваните стойности (Box and Jenkins, 1984). ARIMA от ред $\{AR(p), I(d), MA(q)\}$ се дефинира като:

$$w_t = \sum_{i=1}^p \varphi_i w_{t-i} + \alpha_t - \sum_{j=1}^q \theta_j \alpha_{t-j} \quad (\text{IV. 20})$$

където

$$w_t = \nabla^d y_t \quad (\text{IV. 21})$$

и при $d=1$, $w_t = y_t - y_{t-1}$

Използван е ARIMA (1,1,1) модел за предсказване на $C_{\text{ФПЧ}_{10}}$, който има вида:

$$w_t = \varphi_1 w_{t-1} + \alpha_t - \theta_1 \alpha_{t-1} \quad (\text{IV. 22})$$

Модел 3 – Комбиниран MNR + ARIMA модел

Комбинацията от модели 1 и 2 използва трансформираните данни за температура, относителна влажност, слънцегреење и скорост на вятъра като стационарни времеви редове (трендът е представен като среден абсолютен обем на наблюденията за измервания период). Полученият комбиниран модел може да се запише като:

$$\ln(C_{\text{ФПЧ}_{10}})_t = B_0 + B_1 \ln X_1 + B_2 \ln X_2 + B_3 \ln X_3 + B_4 \ln X_4 + \text{ARIMA} \quad (\text{IV. 23})$$

За конкретното изследване относителната влажност и скоростта на вятъра имат по-голямо влияние върху концентрацията на замърсителя, отколкото слънцегреенето (оценено чрез UV индекс) и околната температура.

Таблица 12 – Изчислени коефициенти на модели 1, 2 и 3

Модел	Променлива	Нестандартизиран коефициент (B)	Стандартна грешка	Стандартизиран коефициент (β)	t	Значимост на t
1	константа	12.836	1.011		14.162	0.000
	ln(X ₁)	-0.191	0.053	-0.148	-3.243	0.001
	ln(X ₂)	-1.435	0.224	-0.286	-6.182	0.000
	ln(X ₃)	0.123	0.043	0.135	2.641	0.009
	ln(X ₄)	-1.311	0.011	-0.511	-10.385	0.000
2	Φ ₁	0.557	0.054		10.033	0.000
	Θ ₁	0.935	0.021		37.194	0.000
3	Φ ₁	0.496	0.061		8.339	0.000
	Θ ₁	0.915	0.032		30.112	0.000
	ln(X ₁)	-0.285	0.049		-5.603	0.000
	ln(X ₂)	-1.217	0.244		-4.799	0.000
	ln(X ₃)	-0.017	0.043		-0.432	0.651
	ln(X ₄)	0.491	0.249		1.895	0.054

Способността на математичните модели да предсказват концентрацията за определен период може да бъде измерена чрез остатъците (или грешката), изучаването на които носи полезна информация за адекватността на предсказването – в идеалния случай тяхното разпределение съвпада с нормално разпределение с нулево математическо очакване и постоянна дисперсия. При анализът на стандартизираните остатъци с Minitab, хистограмите за модели 1, 2 и 3 са получени с много близък до нормалното разпределение вид, със стойности на разпределението представени в Таблица , което потвърждава адекватността на използваните статистически модели в това изследване по отношение на този показател.

Таблица 13 – Статистически анализ на стандартизираните остатъци на модел 1,2 и 3

Модел	N	Mean	StDev
1	21123	-0.01833	0.3377
2	21123	-0.00917	0.4237
3	21123	-0.00789	0.3199

Надеждността на моделите е оценена и сравнена с измерените концентрации на ФПЧ₁₀ от мобилната модулна станция. Статистически индекси и показатели, препоръчвани от ETC-AQ, US EPA и други автори са приложени за оценка на връзката между измерени и предсказани от моделите стойности. Сравнението е представено в Таблица 14.

Таблица 14 – Сравнителен анализ на модели 1,2 и 3

Оценка	Идеална стойност	Модел 1	Модел 2	Модел 3
I	1	0.51	0.77	0.85
R ²	1	0.35	0.65	0.73
MAE	0	0.03	0.005	0.007
MBE	0	-16.73	2.85	2.49
RMSE	0	40.99	18.77	16.55

От получените резултати се вижда, че по показател RMSE комбинираният Модел 3 дава най-ниска стойност от 16.55 µg/m³ в сравнение с другите два модела. Получените резултати както за R², така и за I показват, че най-добър е комбинираният Модел 3.

Модел 4 – Wavelet-ARMA/ARIMA модел

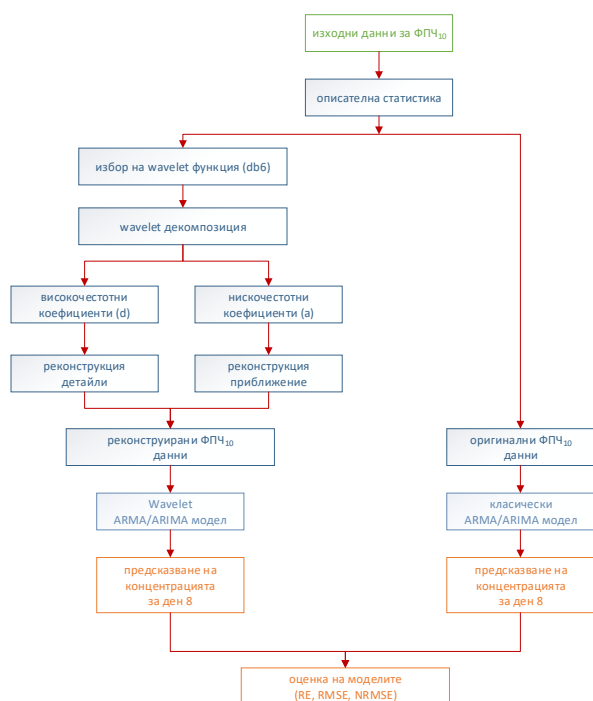
Уейвлет (Wavelet) е математическа функция, която се използва за разлагането на функции или непрекъснати във времето сигнали по честотни елементи и изучаването на всеки честотен елемент с разделителна способност, съответстваща на мащаба му. Предимството на уейвлет преобразуване пред класическото преобразуване на Фурие се проявява при представянето на функции с остри скокове, точки на прекъсване, както и за точното разлагане и възстановяване на крайни непериодични сигнали или на променливи сигнали. Описаните характеристики определят приложимостта на този подход при моделите за концентрация на ФПЧ₁₀, особено в комбинация с ARMA(p,q) и ARIMA(p,d,q).

Модел 4 е реализиран по следния алгоритъм:

- стандартизирани са измерените данни за концентрация на ФПЧ₁₀ от мобилната станция за получаване на входен сигнал за последваща уейвлет декомпозиция;
- избрана е ортогонална и биортогонална Daubechies db6 (k=6) (според Burrus, 1998; Hu et al. 2007; Rafiee et al. 2011) за декомпозиция на сигнала:

$$\psi(t) = \sum_k g_k \Phi(2t - k) \quad (\text{IV. 23})$$

- извършена е уейвлет декомпозиция на сигнала с избраната функция;
- анализирани са компонентите на времевия ред – тенденция на развитието (тренд, Т), сезонна (S), циклична (C) и случайна компонента (E);
- реконструиран е времевия ред, използван като входна информация;
- настроен е ARMA/ARIMA модел по входните данни и по реконструирания времеви ред, при което първите 7 денонощия са използвани за обучение на модела, а данните от 8 денонощия – за проверка на предсказването;



Фигура 42 – Алгоритъм за конструиране на Wavelet-ARIMA модел

Използвани са RE, RMSE и NRMSE, описани по-горе, за оценка на грешката на предсказване на така получените ARMA/ARIMA и wavelet-ARMA/ARIMA модели.

За избор на ефективно работещ модел за концентрацията на ФПЧ₁₀ е приложен Akaike information criterion (AIC) като статистически критерий за оценка на вариантите на ARMA/ARIMA моделите както за оригиналните данни, така и за реконструирания данни – при наличие на набор от кандидат-модели за най-добър се приема този с минимална стойност на AIC критерия. По този начин са определени авторегресионния коефициент $p=1$ и стъпката за пълзящо средно $q=4$ като минимизиращи AIC критерия. Приложен е тестът на Ljung-Box за проверка дали остатъците на ARIMA модела са независимо разпределени – те трябва да представляват бял шум (white

noise), което е индикация за независимо разпределение. Получената стойност на теста $p < 0.01$ показват липсата на автокорелация в остатъците на получените ARMA/ARIMA модели.

В таблица 15 са представени оценките на получените модели, където ясно се вижда по-малката оценена грешка на предсказване на Wavelet – ARMA/ARIMA модел, като за обучителния период, така и за тестовия период.

Таблица 15 – Статистически оценки на ARMA, ARIMA, Wavelet-ARMA и Wavelet-ARIMA моделите

Модел	Обучителен период (28.12.2019 – 03.01.2020)			Тестов период (04.01.2020)		
	RE	RMSE	NRMSE	RE	RMSE	NRMSE
ARMA	0.351	0.065	0.083	0.369	0.093	0.149
ARIMA	0.329	0.061	0.079	0.346	0.087	0.139
Wavelet-ARMA	0.258	0.047	0.062	0.286	0.072	0.114
Wavelet-ARIMA	0.256	0.047	0.061	0.282	0.071	0.113

Модел 5 – Хибриден ARIMA-NN модел

Използването на хибридни модели би могло да подобри значително качеството на предсказване, като се минимизира средната квадратична грешка MSE, описана като:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\text{измерена стойност}_i - \text{предсказана стойност}_i)^2 \quad (\text{IV. 24})$$

Един такъв модел за предсказване на концентрацията на фини прахови частици с аеродинамичен диаметър до 10 μm би могъл да бъде комбинация между ARIMA модел (линеен модел) и невронна мрежа (нелинеен модел) - hARIMA-NN.

Практическият подход за построяване на добър ARIMA модел включва три основни итеративни стъпки: идентификация; оценка на параметрите на модела; проверка на модела (диагностика). Според този подход, данните за ФПЧ₁₀ са нестационарни според анализирания автокорелационна функция ACF, частична автокорелационна функция PACF и тестовите на Dickey-Fuller (ADF) и Kwiatkowski-Philips-Smidt-Shin (KPSS). Трансформиране на данните и прилагането на диференциране води до стационарен процес. Приложен е ARIMA(5,1,5) модел за ΔPM (концентрацията на ФПЧ₁₀), като след итеративна оценка са определени набор от стойности за ϕ и θ , водещи до минимизиране на грешката

$$\Delta PM_t = 0.41\Delta PM_{t-1} + 0.17\Delta PM_{t-2} - 0.06\Delta PM_{t-3} - 0.81\Delta PM_{t-4} + 0.33\Delta PM_{t-5} - 0.60\varepsilon_{t-1} - 0.27\varepsilon_{t-2} + 0.03\varepsilon_{t-3} + 0.86\varepsilon_{t-4} - 0.58\varepsilon_{t-5} \quad (\text{IV. 25})$$

Избрана е трислойна невронна мрежа с право разпространение на сигнала (Multi-layer perceptron, MLP) за предсказващ модел. Изградена е от входен, скрит и изходен слой, като изходния слой предсказва концентрацията на ФПЧ₁₀ във време t и е претеглена сума на изхода от всеки неврон от скрития слой, който може да бъде изразен като

$$PM_t^{approx} = f(W^{(2)} \cdot g(W^{(1)} \cdot PM + b^{(1)}) + b^{(2)}) \quad (\text{IV. 26})$$

Броят на входните възли съответства на параметъра p в ARIMA(p,d,q), D е броят на възлите в скрития слой, $W^{(1)}$ и $b^{(1)}$ е тегловната матрица и вектора на отклоненията между входния и скрития слой, $W^{(2)}$ и $b^{(2)}$ е тегловната матрица и вектора на отклоненията между скрития и изходния слой, и PM е входната матрица от исторически ФПЧ₁₀ данни. Сигмоидна активираща функция за g води до по-ниски стойности на MSE в сравнение с хиперболична тангента, а f е линейна трансферна функция. За определяне на параметрите на невронната мрежа е приложен добре известният метод с обратно разпространение (back-propagation), от където се получава оптимален брой на скритите възли 10, входните възли са 5. Следователно невронната мрежа NNs(10,5,1) може да бъде описана с

$$PM_t^{approx} = f(b^{(2)} + \sum_{j=1}^5 w_{j1}^{(2)} \cdot g(\sum_{i=1}^{10} w_{ij}^{(1)} PM_{t-i} + b_i^{(1)})) \quad (\text{IV. 27})$$

Ако за целите на изследването представим стойностите във времевия ред на измерената концентрация на ФПЧ₁₀ като съставени от линейна автокорелационна структура (L_t) и нелинейна компонента (N_t), то e_t са остатъците при време t

$$Y_t = L_t + N_t + e_t \quad (\text{IV. 28})$$

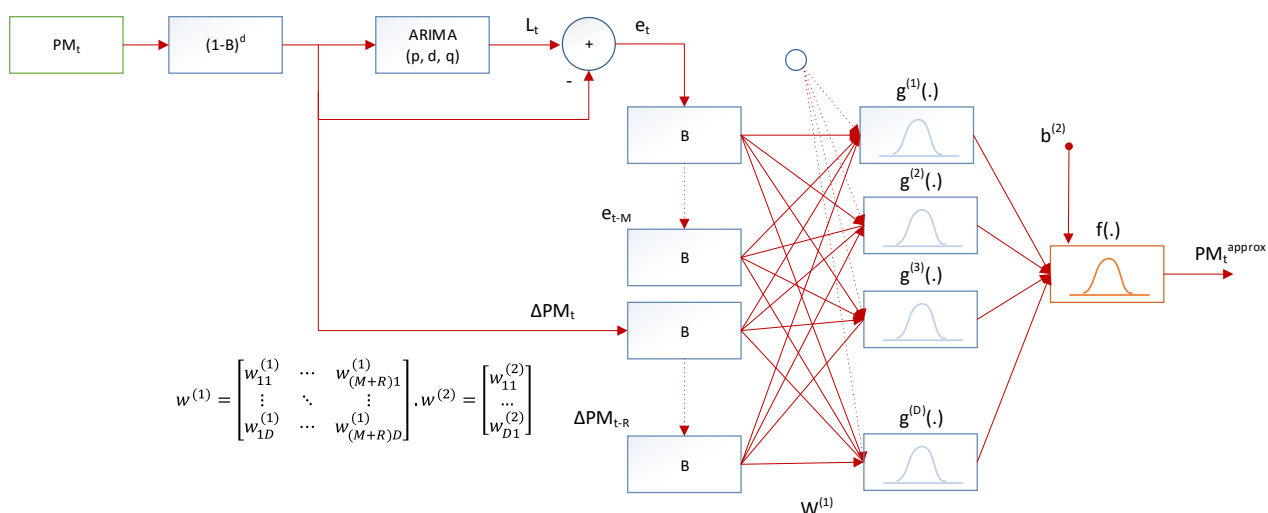
хибридният модел ще има подобна структура на тази на невронната мрежа, с изключение на обединението на остатъците e_t от $ARIMA(p,d,q)$ модела с първите разлики ΔPM_t

$$PM_t^{approx} = h[(\Delta PM_{t-1}, \Delta PM_{t-2}, \dots, \Delta PM_{t-R}), (e_{t-1}, e_{t-2}, \dots, e_{t-M})] \quad (\text{IV. 29})$$

и за $M, R, D = 5$ $hARIMA(p,d,q)N([M,R],D)$, където M и R е броят на входните възли и D е броят на скритите възли, нелинейната mapping функция може да бъде изразена като

$$PM_t^{approx} = f \left(b^{(2)} + \sum_{j=1}^5 w_{j1}^{(2)} \cdot g \left(\sum_{i=1}^5 (w_{ij}^{(1)} (\Delta PM)_{t-i} + b_i^{(1)}) + \sum_{i=6}^{10} (w_{ij}^{(1)} (\Delta PM - ARIMA(5,1,5))_i + b_i^{(1)}) \right) \right) + \varepsilon_t \quad (\text{IV. 30})$$

На Фигура 43 е представена структурата на Модел 5:



Фигура 43 - Хибриден $ARIMA(p,d,q).NNs([M,R],D)$ модел за концентрацията на ФПЧ₁₀

Експерименталните данни за измерените концентрации на ФПЧ₁₀ от мобилната модулна станция за периода 28.12.2019г. – 02.01.2020 г. са използвани за обучение, а данните от 03.01.2020 г. и 04.01.2020г. за валидация на моделите $ARIMA(5,1,5)$, $NNs(10,5)$ и хибридният $hARIMA(5,1,5)NNs([5,5],5)$. Получените стойности за MSE показват същественото предимство на сложните хибридни модели при описание на концентрацията на ФПЧ₁₀ като един от ключовите замърсители на атмосферния въздух.

За подобряване на качеството на моделите, представени в нарастващ ред на изчислителна сложност, могат да бъдат добавени допълнителни входни фактори или да се модифицират хибридните алгоритми.

4.6. Изводи

1. Проучени са възможните приложения на модулна мобилна станция с автономно захранване за мониторинг на параметрите на околната среда в отворени пространства, както и изграждането на географски разпределени мрежи от такива станции. В резултат на това проучване е установено, че поради автономното си захранване всяка една от модулните станции може да бъде разполагана върху т.нар. площни източници на замърсители на атмосферния въздух, като по този начин може да служи за измервателна система на директни емисии. Също така наличието на метеосензори дава възможност за определяне и установяване на условията на възникване на емисия в зависимост от особеностите на локалния микроклимат. Установено е също, че поради липса на изследвания в областта няма изведени емисионни фактори и вариационни коефициенти за емисиите от такъв тип източници, генерирани пориви на вятъра, което е въпрос от национално значение.
2. В резултат на проучването на изискванията на съвременните компютърни системи за моделиране на разпространението на замърсителите в околната среда относно необходимите входни данни е установено, че всеки от често използваните компютърни пакети за моделиране използва като задължително изискване метеорологични данни под формата на стандартизирани електронни формати, най-често за период от една година. Освен това в техните възможности влизат т.нар. променливи емисии, за които обаче са необходими коректно изведени вариационни коефициенти. Системата от модулни мобилни станции с автономно захранване е изключително полезна и ефективна при определянето на такива вариационни коефициенти.
3. Проектирана и разработена е мобилна модулна станция с автономно соларно захранване за мониторинг на параметрите на околната среда, както и програмното осигуряване към нея.
4. Проведени са експерименти за проверка на приложимостта на разработената станция и възможностите ѝ за откриване и регистриране на събития с цел идентификация на произхода на замърсяването, в резултат на което е установено че:
 - при комбиниране на сензор за нивата на ФПЧ с аеродинамичен диаметър до 2.5 и до 10 μm със такива за нивата на eCO_2 и TVOC данните от тях могат да бъдат подложени на статистически анализ, който ясно показва моменти на високи нива на специфични емисии, което е от значение за извеждането на вариационни коефициенти, както и за регистриране на събития и идентифициране на произхода на замърсяването;
 - в резултат на сравнението на данни от станцията с други сензорни станции честотата на събиране на данни е изключително важна за регистрирането на краткотрайни събития, характеризиращи залпови емисии, от една страна, както и за характеризиране на локалния микроклимат от друга;
 - установено е, че избраните хардуерни компоненти работят автономно в широк температурен диапазон и неблагоприятни метеорологични условия, като системата запазва своята стабилност и работоспособност;
 - автономната работа на системата, която е в пряка зависимост от консумацията на енергия от изграждащите модули, е изключително важна, тъй като това я прави приложима за изследване на емисии и/или параметри на околната среда в трудно достъпни райони без налично електрическо захранване;
 - мрежовата свързаност осигурява възможност за предаване на данните в реално време към централизирана система, което е от основно значение за тяхната последваща обработка и анализ.
 - идентифицирането на произхода на замърсяване на въздуха с фини прахови частици и докладването или визуализацията на такъв тип информация, безспорно би било много полезен инструмент при управлението на качеството на атмосферния въздух, своевременното прилагане на специфични мерки за подобряване на КАВ, както и информиране на населението относно произхода на замърсяването.

5. От статистическия анализ на данните, събрани по време на експеримента, могат да се направят следните изводи:
- концентрацията на замърсителите не се подчинява на нормално разпределение, следователно прилагането на филтри, базирани на метода на трите сигми за отстраняване на груби грешки, са неподходящи;
 - установена силна положителна корелация между относителната влажност на въздуха и измерените масови концентрации на $\text{ФПЧ}_{2.5}$ и ФПЧ_{10} при използване на оптичен метод на измерване, базиран на LLS, което показва ненадеждността на показанията на публични разпределени мрежи за мониторинг на качеството на атмосферния въздух (като проекта Luftdaten.info/AirTube/AirSofia.info) при висока влажност на въздуха;
 - приложението на подходящи статистически методи за моделиране на концентрацията на ФПЧ на базата на регресионни модели, Бокс-Дженкинс времеви редове, ARIMA модели и невронни мрежи дава възможност за достатъчно достоверни краткосрочни прогнози или прогнозно попълване на липсващи данни от мониторинга.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящият дисертационен труд е посветен на проблемите свързани с проектирането, изграждането и конфигурирането на сензорни мрежи, свързани в географски разпределени компютърни мрежи с използването на стандартизирани методи и протоколи за маршрутизируема комуникация, както и на анализа, визуализацията и статистическата обработка на данните, постъпващи от тях.

1. След проучването и анализа на необходимостта от осигуряване на Интернет свързаност в района на зададен географски район е установено, че в района на гр. Септември, област Пазарджик към годината на изследването не е изградена цялостна мрежа за пренос на данни и Интернет свързаност от една страна, а броят на потенциалните потребители на услугата е значителен от друга.
2. Проектирано е и е изградено безжично преносно трасе от гр. София, през РРТС вр. Братия до гр. Септември с обща дължина над 107 км. при което са установени необходимите технически параметри и безжични стандарти за комуникация, на цената, зададена в проекта на инвеститора. Установено е, че мрежата е изградена с много по-ниска себестойност от предлаганите на пазара решения и съпоставима надеждност и качество на услугата.
3. Проектиран и разработен е лабораторен експериментален стенд за изследване на мрежови конфигурации и работата на мрежови протоколи. В резултат на проведеното изследване е установена пригодността на стенда за статистическа оценка на качеството на предоставяните услуги. Допълнително преимущество на лабораторния стенд е възможността за провеждането на учебно-преподавателска и научна работа с него. Разработката е представена на научна постерна сесия на ХТМУ – гр. София и е класирана на I-во място в секцията и удостоена с грамота.
4. Изследвана е възможността да се синтезират робастни регулатори за управление в Интернет среда в хетерогенни широкообхватни компютърни мрежи с променливи времезакъснения. Резултатите от това изследване са публикувани в статия [1A].
5. Разработена е разпределена SNMPv1-базирана система за дистанционно наблюдение на параметри на околната среда и параметри на работата на компютърната мрежа, както и за дистанционно управление на хранването на мрежата.
6. Проучени са и са анализирани факторите на жизнена среда в обитаеми затворени помещения, в резултат на което е установено, че:

- факторите като качеството на въздуха в затворени помещения, температурата и влажността, както и осветеността са от съществено значение за здравето и нормалната работоспособност на засегнатите групи от населението;
- съществуват нормативни изисквания относно показателите за качество на въздуха и други фактори на жизнената среда, които много рядко се наблюдават комплексно и едновременно, още по-рядко в реално време.

7. Проектирана и изградена е модулна станция за мониторинг на показателите на жизнената среда в затворени обитаеми помещения, с локално архивиране на събраните данни и мрежова свързаност през различна физическа преносна среда – мобилна, кабелна или безжична компютърна мрежа.

8. Проектирана и изградена е разпределена система от модулни станции за мониторинг на показателите на жизнената среда в реално време в комплексни обекти.

9. Проектирана и е създадена Интернет-базирана информационна система с използване на софтуер с отворен код за централизирано събиране, анализ и визуализация на данните от разпределената система от модулни станции.

10. Проведено е експериментално изследване на изградената система в реален обект – детска градина, в резултат на което е установено, че прилагането на такива системи е мощен инструмент за управление и подобряване на качеството на жизнената среда, както и на организацията на работа. Поддържането на много добро качество на жизнената среда е от огромно значение за здравето на чувствителни групи хора, каквито са децата в детските учебни заведения.

11. Системата е с ниска обща себестойност и използва софтуер с отворен код, което я прави достъпна и лесно приложима и особено подходяща за сгради от обществения сектор.

12. Проучени са възможните приложения на модулна мобилна станция с автономно захранване за мониторинг на параметрите на околната среда в отворени пространства, както и изграждането на географски разпределени мрежи от такива станции. В резултат на това проучване е установено, че поради автономното си захранване всяка една от модулните станции може да бъде разполагана върху т.нар. площни източници на замърсители на атмосферния въздух, като по този начин може да служи за измервателна система на директни емисии. Също така наличието на метеосензори дава възможност за определяне и установяване на условията на възникване на емисия в зависимост от особеностите на локалния микроклимат. Установено е също, че поради липса на изследвания в областта няма изведени емисионни фактори и вариационни коефициенти за емисиите от такъв тип източници, генерирани пориви на вятъра, което е въпрос от национално значение.

13. В резултат на проучването на изискванията на съвременните компютърни системи за моделиране на разпространението на замърсителите в околната среда относно необходимите входни данни е установено, че всеки от често използваните компютърни пакети за моделиране използва като задължително изискване метеорологични данни под формата на стандартизирани електронни формати, най-често за период от една година. Освен това в техните възможности влизат т.нар. променливи емисии, за които обаче са необходими коректно изведени вариационни коефициенти. Системата от модулни мобилни станции с автономно захранване е изключително полезна и ефективна при определянето на такива вариационни коефициенти.

14. Проектирана и разработена е мобилна модулна станция с автономно соларно захранване за мониторинг на параметрите на околната среда, както и програмното осигуряване към нея.

15. Проведени са експерименти за проверка на приложимостта на разработената станция и възможностите ѝ за откриване и регистриране на събития с цел идентификация на произхода на замърсяването, в резултат на което е установено че:

- при комбиниране на сензор за нивата на ФПЧ с аеродинамичен диаметър до 2.5 и до 10 μm със такива за нивата на eCO_2 и TVOC данните от тях могат да бъдат подложени на статистически анализ, който ясно показва моменти на високи нива на специфични емисии, което е от значение за извеждането на вариационни коефициенти, както и за регистриране на събития и идентифициране на произхода на замърсяването;
- в резултат на сравнението на данни от станцията с други сензорни станции честотата на събиране на данни е изключително важна за регистрирането на краткотрайни събития, характеризиращи залпови емисии, от една страна, както и за характеризиране на локалния микроклимат от друга;
- установено е, че избраните хардуерни компоненти работят автономно в широк температурен диапазон и неблагоприятни метеорологични условия, като системата запазва своята стабилност и работоспособност;
- автономната работа на системата, която е в пряка зависимост от консумацията на енергия от изграждащите модули, е изключително важна, тъй като това я прави приложима за изследване на емисии и/или параметри на околната среда в трудно достъпни райони без налично електрическо захранване;
- мрежовата свързаност осигурява възможност за предаване на данните в реално време към централизирана система, което е от основно значение за тяхната последваща обработка и анализ.
- идентифицирането на произхода на замърсяване на въздуха с фини прахови частици и докладването или визуализацията на такъв тип информация, безспорно би било много полезен инструмент при управлението на качеството на атмосферния въздух, своевременното прилагане на специфични мерки за подобряване на КАВ, както и информиране на населението относно произхода на замърсяването.

16. От статистическия анализ на данните, събрани по време на експеримента, могат да се направят следните изводи:

- концентрацията на замърсителите не се подчинява на нормално разпределение, следователно прилагането на филтри, базирани на метода на трите сигми за отстраняване на груби грешки, са неподходящи;
- установена силна положителна корелация между относителната влажност на въздуха и измерените масови концентрации на ФПЧ2.5 и ФПЧ10 при използване на оптичен метод на измерване, базиран на LLS, което показва не надеждността на показанията на публични разпределени мрежи за мониторинг на качеството на атмосферния въздух (като проекта Luftdaten.info/AirSofia) при висока влажност на въздуха;
- приложението на подходящи статистически методи за моделиране на концентрацията на ФПЧ на базата на регресионни модели, Бокс-Дженкинс времеви редове, ARIMA модели и невронни мрежи дава възможност за достатъчно достоверни краткосрочни прогнози или прогнозно попълване на липсващи данни от мониторинга.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ДИСЕРТАЦИЯТА

1. Еленков Г., Методиев В., Йорданов П., Иванов. И., Синтез на робастни регулатори за Интернет – базирано управление, Международна конференция „Автоматика и информатика“, 6-8 октомври 2004г., София, стр. 175-178.
2. Еленков Г., Иванов И. Герджиков И., *Методиев В.*, Принципи на изграждане на отказоустойчиво компютърни мрежи и високопроизводителни сървърни системи, Int. Conference AUTOMATICS AND INFORMATICS 09, Sofia, 2009, p.III-5.
3. Еленков Г., Герджиков Г., *Методиев В.*, Василев Пл., Виртуална среда за обучение базирана на сървър SR2500, Int. Conference AUTOMATICS AND INFORMATICS 10, Sofia, 2010, III-439.
4. Василев Пл., Еленков Г., *Методиев В.*, Герджиков И., Принципи на свързване в интегрирана система за разпределено управление, Anniversary Scientific Conf. With International Participation, Sofia, 18.03.2011, p.225.
5. Elenkov G., Vasilev Pl., *Metodiev V.*, Gerdjikov I., Integrated Distributed Control System, Journal of the Technical University Sofia, branch Plovdiv, “Fundamental Sciences and Applications”, Vol. 16, 2011, International Conference TechSys 2011, p.165
6. Elenkov G., Megdanov G., Gerdjikov I., Vasilev Pl., *Metodiev V.*, A Low-Cost Fault Tolerant Architecture for Computer Networks, Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy, 47, 5, 2012, 559-564.