



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ



ФАКУЛТЕТ ПО ЕЛЕКТРОННА ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ

Катедра Електронна Техника

**Изследване, анализ и усъвършенстване
на системи за регистриране и натрупване
на данни при измервания параметри на
околната среда**

ДИСЕРТАЦИЯ

за присъждане на образователна и научна степен

“ДОКТОР”

маг. инж. Диан Милчев Илиев

Научна специалност: Електронизация

Научни ръководители: доц. д-р инж. Емил Николов Димитров
доц. д-р инж. Митьо Георгиев Митев

София, 2020

Съдържание

ДИСЕРТАЦИЯ	1
Увод	5
1 Системи за измерване физични параметри на околната среда	7
1.1 Параметри на околната среда	7
1.1.1 Термометри	8
1.1.2 Барометри	9
1.1.3 Психрометри и хигрометри	11
1.1.4 Анемометри	13
1.1.5 Други измервателни средства	16
1.2 Системи за метеорологични измервания	18
1.2.1 Системи за дълговременни измервания	18
1.2.2 Системи за отчитане моментните характеристики	19
1.2.3 Други системи	20
1.3 Експертни многопараметрични системи	21
1.4 Изводи	23
1.5 Цел и задачи на докторантурата	24
2 Измерване на метеорологични параметри	25
2.1 Измерване на температура с Pt100	25
2.1.1 Измервателен преобразувател	25
2.1.2 Определяне на калибрационна характеристика	28
2.1.3 Калибриране по точка на замръзване на водата	31
2.2 Измерване на температура с TMP112	34
2.3 Измерване влажност на въздуха с HDC1080	36
2.3.1 Калибриране на сензор за влажност	36
2.4 Измерване на атмосферно налягане с BMP180	39
2.4.1 Калибриране налягането по температурата на кипене на водата	39
2.5 Постигнати резултати	43
3 Измерване параметрите на вятъра	44
3.1 Аеродинамични сили	44
3.1.1 Конструктивни особености	46
3.1.2 Влияние на плътността на въздуха (ρ)	49
3.2 Тензометричен анемометър	53
3.2.1 Механична конструкция	53
3.2.2 Електронно-измервателна система	54
3.2.3 Статичен параметричен анализ	57
3.3 Експериментални резултати	62
3.4 Изводи	66
3.5 Постигнати по-съществени резултати	68
4 Адаптивна система за измерване параметрите на околната среда	69
4.1 Адаптивни системи за метеорологични измервания	69
4.2 Хардуерен дизайн	70
4.2.1 Контрол на мощността	71
4.2.2 Управление	74
4.2.3 Сензори	78
4.3 Софтуерното обезпечаване на системата	81
4.3.1 Адаптивни алгоритми	81
4.3.2 Изпълнителни алгоритми	92
4.3.3 Потребителски интерфейс	102
4.4 Приложение на разработената система	106

4.5	Изводи.....	112
4.6	Постигнати резултати.....	113
	Заклучение.....	114
	Приноси на дисертационния труд.....	116
	Публикации по дисертацията.....	118
	Използвана литература.....	119

Списък на фигурите

фигура 2-1 – Схема за снемане на сигнал от Pt100	26
фигура 2-2 – Грешка от апроксимация на характеристиката на Pt100.....	29
фигура 2-3 – Калибровъчна функция на измервателния канал.....	30
фигура 2-4 – Опитна постановка за калибриране при точката на замръзване на водата	32
фигура 2-5 – Резултати от калибрирането на Pt100	33
фигура 2-6 – Резултати от калибрирането на TMP112	35
фигура 2-7 – Опитна постановка за калибриране на сензор за влажност	36
фигура 2-8 – Резултати от калибрирането на сензора за влажност	37
фигура 2-9 – Опитна постановка за калибриране на сензор за налягане	41
фигура 2-10 – Резултати от калибрирането на BMP180	42
фигура 3-1 – Модел на тензометричен анемометър.....	47
фигура 3-2 – Температурна зависимост на плътността на въздуха.....	50
фигура 3-3 – Зависимост на плътността на въздуха от налягането	51
фигура 3-4 – Блокова схема на тензометричен анемометър	54
фигура 3-5 – Измервателен преобразувател на анемометъра	55
фигура 3-6 – Предавателна характеристика на анемометъра.....	58
фигура 3-7 – Предавателна характеристика при 2S	59
фигура 3-8 – Предавателна характеристика с програмируемо усилване.....	60
фигура 3-9 – Прототип и тестова постановка на анемометъра.....	62
фигура 3-10 – Предавателна характеристика на товарните клетки.....	63
фигура 3-11 – Експериментален резултат на анемометъра.....	64
фигура 3-12 – Функция на грешката от наклона на оста	65
фигура 4-1 – Адаптивна система за многопараметрични измервания.....	70
фигура 4-2 – Подсистемата за контрол на мощността.....	71
фигура 4-3 – Управляваща подсистема	74
фигура 4-4 – Сензорна подсистема.....	78
фигура 4-5 – Диагностика и управление на грешките	83
фигура 4-6 – Блоков алгоритъм на потребителския супервайзор.....	87
фигура 4-7 – Блоков алгоритъм на Адаптивният контрол	89
фигура 4-8 – Функция за добавяне на нови сензори.....	90
фигура 4-9 – Обща Блокова схема	92
фигура 4-10 – Блок алгоритъм на Активния Режим	94
фигура 4-11 – Блоков алгоритъм на Автономния режим	98
фигура 4-12 – Блок схема на работа в реално време.....	100
фигура 4-13 – Блокова схема на приложението	103
фигура 4-14 – Графичен потребителски интерфейс.....	104
фигура 4-15 – Прототип на системата	106
фигура 4-16 – Експериментални данни	107
фигура 4-17 – Статусни данни	108
фигура 4-18 – Полеви измервания	109
фигура 4-19 – Осветеност и статусни данни.....	110
фигура 4-20 – Данни от магнитния сензор.....	111
фигура 4-21 – Данни от третия период.....	112

Списък на Таблиците

Таблица 3-1 – Експериментален резултат на анемометъра.....	64
Таблица 4-1 – Примерна референтна таблица.....	85

Увод

С наблюдаването от края на 50-те години на миналия век повишаване на средната температура на атмосферата и световния океан на Земята, ставаме свидетели на природни катаклизми с непознати досега интензитет и сила. Последните изследвания на промените в климата очертават корелационни взаимоотношения в аспекти, които се считаха за несвързани преди. Миналата година научният комитет на ООН за климата представи доклад с още по-тревожни данни и предвиждащ значително по-тежки последици [84]. Силните дъждове, наводненията, ураганните ветрове, сушата и опустиняването са явления, на които все по-често ще ставаме свидетели и според изследването през следващите години ще се увеличат поради глобалното затопляне. Доклада предвижда, че по-нататъшно затопляне на климата ще доведе до сериозни изменения на обстановката в тропиците и екваториалните зони. Увеличаването на глада и недостига на питейна вода ще доведе до мащабни конфликти и миграционни вълни от най-населените континенти на Земята – Азия и Африка. Големите горски масиви в северното полукълбо също ще бъдат увредени, като пример за това са посочени мащабните пожари в Сибир миналото лято. Леденият континент също се оказва засегнат от случващото се, като миналата година беше регистрирано отделянето на поредния огромен къс лед (D28) – 315 милиарда тона лед с площ около 1600 квадратни километра и дебелина от около 210 метра. С него броят на подобните ледени късове за последните 20 години става около 10, като рекордъра (B15 – 11000 km²) бе регистриран през 2000 година, което загатва и за стряскащите мащаби на тази тенденция.

Според доклада всички тези феномени, причинени от климатичните промени, могат да окажат влияние на запаса от продоволствени продукти. Екстремните събития ще доведат до намаляване на сигурността при доставките на храна по непредсказуем начин, което ще доведе на свой ред

до силни колебания в цените. Това ще засегне главно най-бедното население и производителите от тези региони. Данните от доклада показват също, че високите нива на въглероден диоксид в атмосферата понижават качеството на хранителните продукти (5,9-12,7% по-малко белтъчини, 3,7-6,5% по-малко цинк и 5,2-7,5% по-малко желязо).

Според експертите, ако средната глобална температура се повиши с повече от 2 градуса по Целзий, плодородните земи ще се превърнат в пустини, инфраструктурата изградена в района на целогодишен студ и сняг ще бъде унищожена, а сушите и екстремните метеорологични събития ще застрашат отглеждането и производството на хранителни продукти. Стойността от 2 градуса по Целзий е максимумът определен в споразумението на участниците на срещата на върха по въпросите на климата в Париж [85].

С оглед на възможните последици при запазването на тези тенденции в изменението на климата и с цел изучаване на измененията на климата в глобален мащаб, нараства нуждата от проследяването на все по-голямо количество параметри, на все повече и по-трудно достъпни места по света. Нарастващата нужда от разнообразна и специализирана апаратура за изследване на причинно-следствените връзки от човешкото въздействие поставя учените в трудната ситуация да избират между изследването на ограничено количество стандартни параметри предоставяни от класическите метеорологични станции или използването на специализирана апаратура за изследването на нестандартни параметри. Този проблем е особено съществен при работа в отдалечените райони и при екстремни условия, където монтажът на подобни съоръжения е силно възпрепятстван от щетите, които условията нанасят върху скъпо струващата техника.

1 Системи за измерване физични параметри на околната среда

В глава 1 е направен обзор на актуалните системи за измерване параметрите на околната среда. Разгледани са основните типове сензори и методи за измерване на температура, налягане, влажност, осветеност, скорост и посока на вятъра като част от метеорологични системи. Посочени са техните предимства и недостатъци.

1.1 Параметри на околната среда

Климатът е многогодишното статистическо описание на времето, характерно за дадена местност в зависимост от географското ѝ положение. Метеорологичното време е съвкупност от метеорологични явления, които се случват в атмосферата на дадено място и в даден момент [56][63].

За описването и характеризирането на времето и климата се използват параметри като температура, атмосферно налягане, влажност, валежи, скорост и посока на вятъра. За да се гарантира представителност на измерванията, Световната метеорологична организация (СМО) издава предписания за методите и неопределеността на измерване на метеорологичните параметри [86]. В това ръководство са включени още и изискванията за измерване на облачност, слънчево греене, видимост, вълнение и изпарение.

В исторически план измерването и проследяването на гореизброените параметри е съпътствано от дълга еволюция на измервателните прибори и техните характеристики. С развитието на технологиите и необходимостта от получаване на повече данни от повече измервателни станции, мотивира стремежа за развитие на съвременните измервателни прибори да става в посока на изследване, анализ и усъвършенстване на схеми и системи за преобразуване на неелектрически величини в електрически. Този подход позволява автоматизация на процеса по събиране и обработка на данните

да се осъществява в глобален мащаб, като значително редуцира технологичното време. Той обаче налага и необходимост от търсене на нови методи за измерване на параметрите с подходяща за целта точност.

1.1.1 Термометри

Температурата е физична величина, характеризираща средната кинетична енергия на частиците от дадена макроскопична система, намираща се в състояние на термодинамично равновесие [41]. Тя е свързана също със субективните усещания за топло и студено, а количествено се измерва с термометри, които могат да бъдат калибрирани да показват величината в различни скали. Основната мерна единица за температура определена от Международната система единици (SI) е Келвин (K) [87]. За по-голямо удобство често се използва скалата на Целзий, която съвпада по относителна стойност с тази на Келвин, но е изместена по абсолютна стойност с 273,15 градуса.

Методите и техниките за измерване на температурата са се развивали много активно през годините. Използвани са редица физични явления като топлинно разширение, оптично излъчване, изменения в акустичните, електрическите или оптичните параметри на веществата и т.н.

Измерването на температурата от гледна точка на съвременните електронни системи е фокусирано върху изменението на различни електрически характеристики на термометричното вещество. Най-широко разпространени в практиката са полупроводниковите сензори, термодвойките, терморезисторите и термисторите [34][91].

Полупроводниковите сензори са изключително широко разпространени и лесни за интегриране в автоматични системи. Ниската им цена и непрекъснатото подобряване на характеристиките им ги прави подходящи за индустриални и комерсиални приложения. И макар че се използват във все повече системи за температурен контрол, относително ниската им точност и ограничен работен температурен диапазон [43] не

позволяват те да бъдат използвани като източник на представителни данни за метеорологични изследвания, съгласно изискванията на СМО. Въпреки това, с подходящо калибриране те биха могли да се използват успешно като източник на данни за компенсационни алгоритми, преобразувания при измерването на други величини и управление на системните процеси.

Термодвойките от своя страна предлагат много широк работен температурен диапазон, добра чувствителност и ниска цена. Точността им обаче е ниска [88] и дори при прецизно калибриране и отлична компенсация на студения край, много трудно биха постигнали изискванията за метеорологичните измервания на СМО. В този аспект термодвойките са най-подходящи за измервания в широк температурен обхват (1800 K).

Термисторите и терморезисторите от своя страна притежават необходимата точност в метеорологичния температурен диапазон [92], което ги прави подходящи за употреба при правилно калибриране. Недостатък на термисторите в случая е силната нелинейна характеристика, която прави калибрирането на сензора в дадения температурен диапазон доста сложно. За разлика от тях, терморезисторите имат силно изразена линейна характеристика. И в двата случая обаче трябва да се има предвид ефекта на самонагряване, който може да доведе до значително влошаване на характеристиките.

1.1.2 Барометри

Налягането е физична величина, характеризираща големината на натиска (нормалната съставляща на силата), който действа върху единица площ [89]. От гледна точка на метеорологията значение има атмосферното налягане – налягането върху всяка площ в атмосферата, предизвикано от теглото на въздуха. Промените в атмосферното налягане пораждат движение на въздушни маси (вятър) от зоните с по-високо към зоните с по-ниско налягане. Когато тези зони са с различна температура се образува

кондензация на парите във въздуха, което образува облаци, валежи и други явления [29], поради което атмосферното налягане е от значение за метеорологията. Количественото измерване на атмосферното налягане става с помощта на уреди наречени барометри. Мерната единица за налягане е Паскал (Pa), но се използва и милиметри живачен стълб (mmHg), което е останка от първите барометри конструирани от Торичели – стъклена тръбичка, запушена от едната страна и напълнена частично с живак, потопена с отворения си край в съд с живак. При живачния барометър атмосферното налягане се измерва като аеростатичното налягане на въздуха се уравнисява с хидростатичния натиск на живака [27]. Този метод на измерване на атмосферното налягане обаче се използва все по-рядко, основно заради наложените рестрикции от Европейския Съюз за ограничаване продажбите на живак [83].

Съвременното отчитане на атмосферното налягане става с помощта на anerоидения барометър – херметично затворена кутия с фиксирано налягане, която се раздува или свива при промяна на външното налягане. Това изменение се отразява на скала с помощта на допълнителна система. От гледна точка на електронните измервания, тази система може да е изградена на базата на няколко вида сензори:

- Тензорезистивни – механичната деформация води до изменение в съпротивлението на тензорезистор, чиято стойност се измерва.
- Капацитивни – промяната в налягането води до изменение в характеристиките на кондензатор, чийто капацитет се измерва.
- Пиезоелектрични – използва се пиезоефекта за измерване на механичната деформация.
- Магнитострикционни – механичната деформация води до изменение в магнитните свойства на сензора.

През последните години се наблюдава сериозно развитие на микро-електро-механичните системи (MEMS). Базирайки се на изброените по-горе методи за измерване на атмосферното налягане, MEMS барометричните сензори набират широка популярност при използването

им в преносими системи и автоматични измервателни станции [93]. Те обаче са силно зависими от странични фактори, като температурата и влажността, които могат да доведат до значителни отклонения в измерванията им. Характеристиките на тези системи са такива [99], че трудно биха могли да покрият изискванията на СМО за представителност на данните. Въпреки това, с подходящо калибриране и компенсиране [59], техните характеристики могат значително да бъдат подобрени.

1.1.3 Психрометри и хигрометри

Влажността на въздуха е мярка за количеството водна пара във въздуха и е една от най-съществените характеристики на времето и климата, тъй като отразява вероятността за валежи, роса и мъгла. Тя има съществено значение и по отношение на терморегулацията на бозайниците, влияейки върху скоростта на изпарение на потта от повърхността на кожата [81]. Измерването на влажността става основно по три параметъра:

- Абсолютна влажност – количеството водна пара в 1 куб.м влажен въздух при определена температура. Измерва се в kg/m^3 (g/m^3).
- Относителна влажност – отношението между количеството водна пара, намираща се във въздуха и максималното количество водна пара, което въздуха може да поеме при една и съща температура на въздуха. Изразява се в проценти.
- Специфична влажност – отношение на плътността на водната пара към плътността на влажния въздух

Влажността на въздуха се измерва с психрометър и хигрометър.

Измерването с психрометър се основава на зависимостта между влажността на въздуха и скоростта на изпарение на водата от влажна повърхност [21]. При класическия метод се използват два живачни термометъра с еднакви по форма и обем резервоари. Единият от тях, наречен „сух“, се използва и за измерване на температурата на околния въздух. Резервоарът на другия термометър (наречен „мокър“) е обвит в материя (най-често памук или марля), която се поддържа във влажно

състояние с помощта на фитил, потопен в съдче с вода. Както е известно, процесът на изпарение е свързан с приемане на топлина. Колкото по-интензивно е изпарението, толкова повече топлина е необходима. Това води до охлаждане на резервоара на „мокрия“ термометър, пропорционално на влажността на околния въздух. Поради това, температурата, която показва „мокрият“ термометър, винаги е по-ниска (или равна) от тази на „сухия“. С помощта на психрометричното уравнение се изчислява влажността на въздуха. Има и готови психрометрични таблици за определяне на влажността на въздуха по температурната разлика между „сухия“ и „мокрия“ термометър, температурата и налягането на атмосферния въздух. За разлика от пълното психрометрично уравнение в тези таблици не се отчитат особеностите на различните конструкции термометри, поради което не са универсални.

Модификация на метода е използване на термосъпротивления, което позволява обработка на електрическите сигнали (линеаризиране и преобразуване от аналогов в цифров вид) и изчисляване на характеристиките на влажността на въздуха от микропроцесорен модул [72][60].

Има някои особености при използването на „мокрия“ термометър при зимни условия, които следва да се съблюдават, за да бъдат данните реални. Трябва да се имат предвид и възможните грешки предизвикани от примеси във водата и от вероятността резервоарът с вода да се изчерпи при дълговременни измервания. Чрез този метод обаче може да се постигне точност на измерване, която е значително по-висока от постижимата с кондензивни и резистивни сензори, което го прави много подходящ за сравнителни измервания и калибриране на сензори за влажност.

Хигрометърът е уред, с който се измерва относителната влажност на въздуха. Съвременните хигрометри се състоят от сензор, чиято конструкция е такава, че влажността на въздуха влияе директно върху

електрическите му характеристики (капацитет [42] или съпротивление [57]). Тези сензори са податливи на замърсяване, което води до натрупване на грешки при отчитането им. Непрекъснатото подобрене в точността и ниската им цена обаче ги правят удобни и предпочитани средства при дълговременни измервания, а подходящото калибриране би могло да подобри точностните им характеристики.

1.1.4 Анемометри

Вятърът представлява движение на въздушните маси от места с високо към места с ниско атмосферно налягане. При вятър въздухът се движи в две направления спрямо земята – хоризонтално и вертикално.

Системните наблюдения на вятъра обикновено отчитат двете основни характерни величини посока и скорост. В някои случаи се измерват и други характеристики, като вертикалното разпределение на ветровете в различните атмосферни слоеве. Това става с помощта на радиосонди или метеорологични балони, снабдени с различни уреди, които се издигат и извършват измервания на различни височини.

За посока на вятъра се приема посоката, от която той духа, като тя може да бъде определена с помощта на ветропоказател.

Скоростта на вятъра представлява пътя, изминат от въздушния поток за единица време и се измерва в m/s. Допълнителна характеристика на скоростта са поривите – максимални моментни стойности. Измерванията на скоростта се извършват с помощта на анемометри, като повечето от тях са комбинирани с ветропоказатели за отчитане посоката на вятъра.

Съществува голямо разнообразие от анемометри в зависимост от измервателния ефект, който те използват. Най-широко разпространен в метеорологичните измервания е чашковият анемометър – полусферични чашки захванати към хоризонтални рамена и монтирани на вертикална ос. При тази конфигурация скоростта на вятъра се отразява от въртящия

момент на вертикалната ос, създаден от въздушния поток обдухващ чашките.

Подобен на чашковия е перковият анемометър, но вместо в хоризонтално направление, рамената са във вертикално и придържат перки, върху които напорът на вятъра създава въртящ момент на вече хоризонталната ос.

Общото между тези два вида анемометри е наличието на подвижен компонент, на базата на който се извършва директно измерване на скоростта на вятъра. Това прави тези системи уязвими на задръстване от фини частици и замръзване. Недостатък на тези системи е и необходимостта от допълнителен ветропоказател за измерване посоката на вятъра. В случая на перковия анемометър ветропоказателят е дори задължителен компонент, тъй като се налага завъртане на перките по направлението на вятъра, за да може измерването да бъде направено коректно.

Такъв е и случаят с тръбите на Пито [55] – система от тръби, позволяваща манометричното съпоставяне на налягането създадено от движението на флуид и статичното му налягане. Тази система намира широко приложение при измерването на скоростта на самолети и лодки [74]. Модификацията на системата за целите на метеорологичните измервания [94] включва добавянето на ветропоказател, който подобно на перковия анемометър, ориентира активния край на сензора по посока на вятъра. Недостатък на тази система, освен споменатият по-горе подвижен елемент, е и наличието на отвор за активно измерване на въздушния поток. Този отвор е податлив на запушване (от прах, лед, насекоми и др.), в следствие на което системата става неизползваема.

Алтернативни решения са използването на ултразвукови [20] и резонансни [31] анемометри. Ултразвуковият анемометър използва ултразвукови трансдюсери, измервайки скоростта на вятъра по времето за

разпространение на сигнала. Резонансните анемометри са по-съвременна адаптация на ултразвуковите, при които измерването на скоростта на вятъра става на базата на акустични резонансни вълни, отразени от специално направени кухини.

Тези системи обаче са значително енергоемки, а рискът от замръзване, обледеняване и задръстване продължава да съществува [36]. За приложения изискващи непрекъснато функциониране при условия на обледеняване, са разработени версии на ултразвуковите и чашковите анемометри с подгряване. Тези модификации обаче могат да се окажат сериозен проблем при използването на такива системи в отдалечени райони без постоянен енергоизточник.

Съществуват и някои по-неконвенционални методи за измерване на скоростта на вятъра, като анемометрите с нагреваема жица (hot-wire) [95]. Те използват охлаждащия ефект на въздушния поток за да определят скоростта му. За целта се използват тънки проводници от платина или волфрам, които се нагряват до температура над тази на околната среда [52], а охлаждащият ефект на вятъра се отразява директно на тяхната проводимост. Недостатък на този метод е необходимостта от излагане на финия проводник на тежки метеорологични условия, които могат да доведат до скъсването му. Измерването на посоката на вятъра с тази система също има нужда от допълнителен компонент.

Нови методи като сферичния анемометър [25] предлагат решение на проблема с допълнителния ветропоказател, но енергоефективността, цената, както и различни източници на грешки и смущения са все още пречка пред използването им в отдалечени райони и при тежки условия. Необходимо е намирането на евтино решение с характеристики подходящи за метеорологичните измервания в такива условия.

1.1.5 Други измервателни средства

Към изброените по-горе метеорологични параметри могат да се прибавят още валежи, облачност, слънчево греене, видимост, вълнение и изпарение.

Под валеж в метеорологията се разбира както падналата от облаците вода, така и водата, отложена (кондензирана) по земната повърхност [32]. И в двата случая водата може да е в течно или твърдо състояние. Всички валежи се дължат на една и съща причина – ниската температура на земната повърхност и на приземните въздушни слоеве [96]. В метеорологичните станции се наблюдават всички видове валежи. За произхождащите от облаците валежи се наблюдава тяхното времетраене и количеството на валежа за определено време, а за останалите валежи (роса, слана, поледица) се отбелязва само времето на появяването им. Количеството на валежа се определя по дебелината на водния пласт, който би се образувал върху хоризонтална повърхност, без да става попиване, оттичане и изпаряване. Измерва се в mm височина, което съответства на широко възприетата мярка dm^3/m^2 [66][28]. За измерването на падналия дъжд се използват уреди наречени дъждомери (плувиометри), а класическият метод за отчитане става с мерителни стъкленици. Разграфяването е такова, че на едно деление съответства 1 mm. Класическите автоматизирани методи за отчитане включват тегловите [14], капково-броячните [65][9][45][70] и сифонните дъждомери.

Алтернативно измерването на падналия валеж може да стане по размера на падащите хидрометеори, като в този случай уредите се наричат дисдрометри [28][62]. Дисдрометрите са подходящи за измерване не само на падналото количество дъжд, но и за сняг и градушка. Интересни разработки в областта на автоматичните дисдрометри от последните години са модификацията на келвиновия генератор [61] и модификация на

тегловият метод с Брагова дифракционна решетка [33]. В по-глобален мащаб количеството валежи се следи и от спътникови системи [97].

Слънчевото греене е характеристика, която набира силна популярност с развитието на фотоволтаичните и хидросоларните системи. От метеорологична гледна точка, слънчевото греене е мощността получена от слънцето върху определена площ и се измерва във ватове за квадратен метър (W/m^2) [8]. Слънчевото греене може да бъде измерено с помощта на пиранометри [4][80], радиометри [49], сензори за осветеност [67][44][11][30] и др.

През последните години се забелязва и засилен интерес към проследяването на параметри извън рамките на описаните от СМО – замърсеност на въздуха [38][13][6], нива на въглеродния диоксид [79][39] и други газове [54][77], замърсеност на водата [19], регистриране на мълнии [76][51], магнитни и геомагнитни полета [15][68][78], геофизични и сеизмични явления [7][71][23], радиационен фон [26] и много други.

Въпреки наличните автоматични методи на отчитане, изброени по-горе, подобни системи рядко се предоставят като стандартна окомплектовка към метеорологичните станции и трудно могат да се включат към съществуващите системи.

Много от разработените сензори са относително евтини, но невъзможността да бъдат свързани към готовите системи чрез прост стандартен интерфейс, принуждава разработчиците да изграждат сензорите като цялостна система за събиране на данни, което допълнително ги оскъпява.

Всички тези фактори показват нуждата от разработването на по-отворени системи, които да допускат адаптирането на станциите към нуждите на измерванията, вместо текущият модел на адаптиране на измерванията към наличните готови системи.

1.2 Системи за метеорологични измервания

Метеорологичните станции са съоръжения, снабдени с инструменти за извършване на наблюдения и измервания на атмосферните условия с цел изготвянето на прогнози за времето и изследване на закономерностите в климата. В зависимост от целта на измерванията и темпа на събиране на данни съществуващите системи могат да се разделят на две категории – системи за дълговременни измервания и системи за измервания в реално време.

1.2.1 Системи за дълговременни измервания

При изследванията на закономерностите в климата е необходимо да се анализират данните от дълговременни метеорологични измервания [56][63]. Най-често наблюденията в метеорологичните станции се извършват трикратно в денонощието (съгласно изискванията на Световната метеорологична организация в Женева, всички наблюдения да стават при еднакви положения на слънцето по отношение на всяка станция [86]), данните от денонощните измервания се събират и съхраняват за допълнителен анализ в рамките на различни времеви интервали (3 месеца, 6 месеца, 1 година и т.н.), описвайки тенденциите в изменението на климата. Често станциите са разположени на удобни и лесно достъпни места, а данните могат да бъдат отчитани редовно. Понякога обаче научен интерес представляват отдалечени райони без постоянен достъп (необслужваеми зони). В този случай се налага използването на по-сложни апарати способни да извършват операциите по отчитане, съхранение и настройка самостоятелно, като се взима предвид енергийната им безопасност и работните условия в съответната зона [75][10]. Основните изисквания към системите предназначени за дълговременни измервания при работа в отдалечени райони и при екстремни условия се свеждат до:

- Постигането на минимална консумация, поради невъзможност тя да бъде обслужвана регулярно.

- Минимизиране на цената на устройството, тъй като е възможно то да бъде изгубено или повредено.
- Минимизиране на размери и тегло, позволяващи лесното му пренасяне до интересните места за изследване.
- Подсигуряване на лесен монтаж и поддръжка.
- Подсигуряване ефективното функциониране на системата при отказ на един или няколко нейни компонента.

1.2.2 Системи за отчитане моментните характеристики

За редица дейности (въздухоплаване, корабоплаване, научни изследвания и т.н.) фокуса на измерванията е съсредоточен върху текущото състояние на параметрите на околната среда [64][46][69]. За целта се използват съоръжения позволяващи следенето на параметрите на околната среда в реално време [86][47]. Работата в реално време изисква системата да гарантира отговор в рамките на определени времеви ограничения (крайни срокове) [5]. Една система, работеща в реално време, може да се опише като система, която получава данни, обработва ги и връща резултата от изчисленията достатъчно бързо, за да повлияе на събитията протичащи успоредно с реалното (истинското) време [40]. Съгласно указанията на СМО за автоматични метеорологични станции работещи в реално време, те трябва да могат да предоставят данни на потребителя непрекъснато – на предварително дефинирани времеви интервали, но и при инцидентни събития или при подаване на заявка [86].

Това позволява данните от тези измервания да се използват като референтни за други измервания извършвани в паралел или да се използват като входни данни за други системи. Основните изисквания към системите, предназначени за работа в реално време, може да се обобщят до:

- Да могат да предоставят данни на предварително дефинирани интервали, но и при инцидентни събития или при подаване на заявка (реално време).

- Да са в състояние да измерват разширен набор от параметри.
- Да са в състояние да обработват и визуализират постъпилите данни в удобен за оператора формат.
- Да са лесни за използване и обслужване, позволявайки на оператора да извършва широк спектър от операции за кратко време.

1.2.3 Други системи

За редица изследвания би било от изключително удобство, ако наличните системи за дълговременни измервания могат да се използват като източник на референтни данни за параметрите на околната среда [48][17]. Подобно решение би облекчило логистиката и дава възможност за разширяване обхвата на извършваните изследвания.

За тази цел е необходимо подsigуряването на системи за метеорологичен контрол едновременно в двете направления – измерване параметрите на околната среда в реално време като помощно средство за извършване на паралелни измервания и обезпечаване на дълговременни метеорологични измервания с цел събиране на статистическа информация за изменението на климата по време на необслужваемия период. Тези условия поставят две противоречиви изисквания към системата:

- Осигуряване следенето на широк набор от параметри в реално време, където изискванията към общата производителност на системата са значителни.
- Редуцирането на консумацията от системата за да се обезпечат дълговременните измервания.

Оптималното решение е създаване на адаптивна компактна система подsigуряваща всички необходими измервания за подпомагане на експериментите извършвани в реално време и способна автономно да обезпечи серия дълговременни метеорологични измервания чрез автоматично регулиране на консумацията и темпа на измерване в зависимост от нуждите на изследването.

1.3 Експертни многопараметрични системи

С развитието на техниката стават достъпни все повече сравнително евтини прибори, позволяващи измерването на голям набор от параметри на околната среда. Многообразието, миниатюризацията и ниската консумация на тези прибори позволяват изграждането на мобилни и лесно преносими измервателни системи. Макар и все още ниска, точността на провежданите измервания с тези прибори непрекъснато се подобрява, което мотивира тяхното използване във все по-големи мащаби. Функциите и възможностите на тези системи нарастват значително, а с това нараства и сложността на тяхното управление и настройка, налагайки специфично обучение за техните оператори. Когато обаче става въпрос за мобилни и преносими устройства за работа на трудно достъпни места и при тежки условия, подобни изисквания за обучение на оператора могат да се окажат сериозен проблем.

Към всичко това може да се добавят и все по-големите изисквания към системите да се адаптират лесно към изпълнението на специфични задачи, без това да налага сериозно познание нито на инженера в специфичната област на приложение на системата, нито от оператора в специфичните за системата инженерни дейности. Всички тези условия постепенно водят до нуждата от изграждането на експертни системи, способни до голяма степен без намесата на оператор да изпълняват широк набор от задачи и да постигат поставени цели [3][1][16].

Експертните системи са информационни системи за работа със знания, които наподобяват способността за вземане на решения от човек, експерт в дадена област. От особен интерес за инженерните дейности и за конкретния случай на разглеждане е концепцията за „рационално действащите“ системи – автономни обекти, които възприемат околната си среда посредством сензори и извършват действия над тази среда посредством актуатори в опит за постигане на зададени цели [50][58][24].

„Експертизата“ на тези системи се основава на способността им да проявят целесъобразно поведение, основано на вградени знания, поредицата възприети до момента сведения от средата, възможностите за извършване на действие и оценка на ефективността на поведението, с която се определя емпирично критерия за успех [17][18].

Трябва да се има предвид, че тази способност за целесъобразно поведение обикновено е свързана с изчислителна мощност, която нараства пропорционално на обема входно-изходни комбинации. Това поставя определени ограничения при изграждането на алгоритмите, които трябва да управляват подобни системи. В този аспект трябва да се има предвид енергийното обезпечаване на системите и съответно минимизирането на енергоразхода от изчислителна мощност, използвана от контролните алгоритми. Нещо повече – има смисъл да се разгледа възможността самите експертни алгоритми да подобряват цялостната енергийна ефективност на системата, като идентифицират и терминират ненужни процеси в нея. Същевременно изпълнението на тези алгоритми трябва да се ограничи до използването на тривиално количество системни ресурси.

1.4 Изводи

От направения преглед и анализ на методите и средствата за измерване параметрите на околната среда могат да се направят следните по-важни изводи:

1. Съществува голямо разнообразие от автоматични метеорологични станции с прецизни сензори за измерване основните параметри на околната среда. Повечето изискват обезпечаване с мрежово захранване и не допускат включването на допълнителен набор от сензори. Обикновено цената им е твърде висока.
2. Достъпни са сравнително евтини прибори позволяващи дълговременни измервания на различни параметри на околната среда при захранване от автономен източник. Точността на провежданите измервания обаче е ниска, а получените данни много често са повлияни от други съпътстващи параметри.
3. Разгледаните методи за измерване скоростта и посоката на вятъра се оказват практически неприложими, когато става дума за дълговременни измервания в необслужваеми зони и при екстремни условия.
4. При повечето прибори остава открит въпросът с въвеждането на коригиращите коефициенти след провеждане на калибровка с цел привързване на скалите им.
5. Изключителна актуалност придобива въпросът за дълговременно измерване и регистриране на нестандартни параметри на околната среда, отразяващи въздействието на човешката дейност в отдалечени райони. Добавянето на нестандартни сензори към съществуващите измервателни системи е силно затруднено поради затворения характер на системите.

1.5 Цел и задачи на докторантурата

Целта на дисертационния труд е изследване, анализ и усъвършенстване на методи, схемни решения и апаратури за измерване параметри на околната среда в необслужваеми зони и при екстремни условия, които допускат използване в реално време.

Задачи на дисертационния труд са:

1. Изследване възможностите на сензори за налягане, влажност и температура и оптимизиране на схемните решения и процедури за обработка на данните с оглед понижаване на консумацията, подобряване на точността и обезпечаване надеждната работа на системата.
2. Проучване и изследване на нови възможности за дълговременно измерване на параметрите на вятъра при екстремни условия.
3. Създаване на методология и апаратура за дълговременно регистриране на основни параметри на околната среда в екстремни условия и с възможност за работа в реално време.
4. Проучване и анализ на възможностите за използване на техниките и методите на експертните системи при изграждането на адаптивни самоподдържащи се устройства.

2 Измерване на метеорологични параметри

В глава 2 са разгледани възможностите на сензори за налягане, влажност и температура. Предложени са методи за оптимизиране на схемните решения и процедури за обработка на данните с оглед понижаване на консумацията, подобряване на точността и обезпечаване надеждната работа на системата.

2.1 Измерване на температура с Pt100

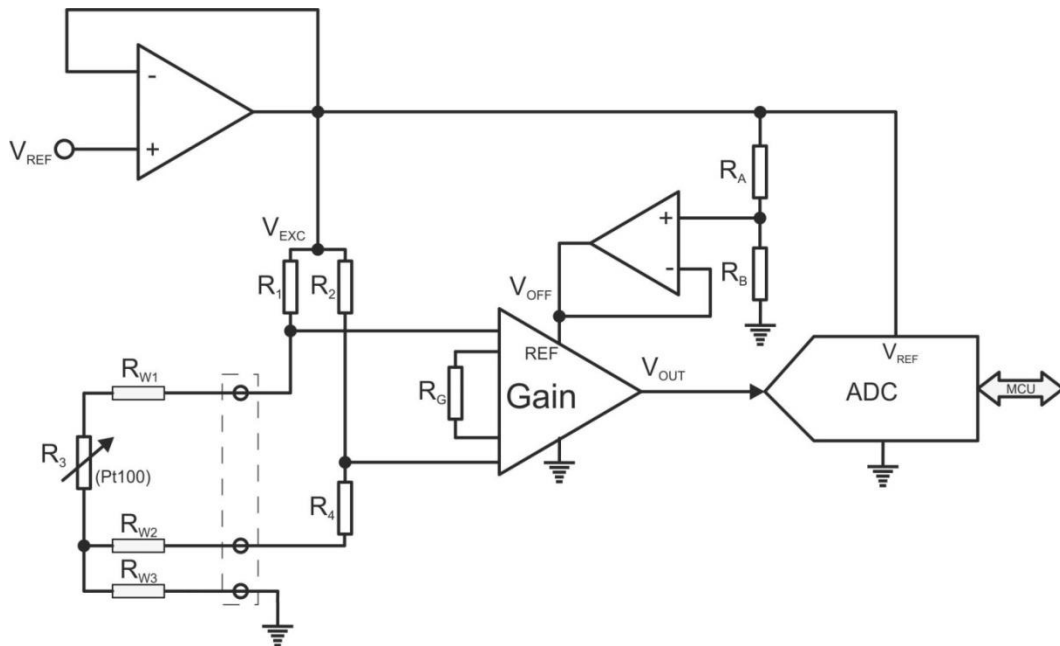
Основните изисквания за характеристиките на инструментите за метеорологични измервания се дефинират от световната метеорологична организация [86]. За термометрите се изисква неопределеността в измерванията на температурата на въздуха да са под 0,3 К за температури под -40°C и над $+40^{\circ}\text{C}$; а за температури между -40°C и $+40^{\circ}\text{C}$ тя трябва да е 0,1 К.

Най-подходящите широко разпространени прецизни сензори за измерване на температурата несъмнено са платинените терморезистори. Индустриалният стандарт EN DIN 60751:2008 дефинира толерансите на тези сензори, като за клас А те са $\pm(0,15^{\circ}\text{C}+0,002|t|)$, за клас В са $\pm(0,3^{\circ}\text{C}+0,005|t|)$, а за клас АА са $\pm(0,10^{\circ}\text{C}+0,0017|t|)$.

2.1.1 Измервателен преобразувател

Измерването на температурата с помощта на платинен терморезистор се свежда до измерването на съпротивлението на сензора, за което има множество разработени схеми. Основен проблем при изграждането на такива схеми е температурната зависимост на свързващите проводници. За неутрализиране на тяхното влияние се използват трипроводни и четирипроводни схеми на свързване. Четирипроводните схеми на свързване имат предимство при измерване в по-широк температурен диапазон, докато трипроводните са по-подходящи за измерване в по-тесен.

Поради това, тук ще разгледаме само схема на трипроводно свързване. На фигура 2-1 е представена схемата на входния преобразувател с трипроводно свързване на температурния сензор.



фигура 2-1 – Схема за снемане на сигнал от Pt100

На фигурата всеки проводник е представен чрез съответстващото му съпротивление R_{W1} , R_{W2} и R_{W3} . Ако R_{W1} и R_{W2} са равни, както и токовете през тях, напрежителните падове върху тях ще се компенсират, защото са приложени в противоположни посоки на измервателния контур.

Използването на мостова схема за свързването на сензора дава възможност да се реши един съществен проблем на аналоговите измервателни схеми – нестабилността на опорното напрежение за аналогово-цифровия преобразувател.

Предавателната характеристика на резистивния мост от фигура 2-1 се дефинира както следва:

$$(2-1) \quad V_O = \frac{R_3}{R_1+R_3} \times V_{EXC} - \frac{R_4}{R_2+R_4} \times V_{EXC} = \left(\frac{R_2 \times R_3 - R_1 \times R_4}{(R_1+R_3) \times (R_2+R_4)} \right) \times V_{EXC}$$

Където V_{EXC} е захранването на моста, а V_O е изходното напрежение на моста. Последното се подава на входа на диференциален усилвател. При

такъв тип измервания трябва да се обърне специално внимание на използваните усилватели.

Ако означим отношенията на съпротивленията в скобите от уравнение (2-1) с K_R , а коефициента на усилване на диференциалния усилвател с K_A , за изходното напрежение на усилвателя получаваме:

$$(2-2) \quad V_{OUT} = V_{EXC} \times K_R \times K_A + V_{OFF}$$

Напрежението V_{OFF} е офсетното напрежение с което е повдигнато изходното ниво на усилвателя. Повдигането на изходното ниво се налага поради характера на входящия сигнал, който може да приема както положителни така и отрицателни стойности. Удобно е то да бъде получено от захранването на моста чрез делител, от където следва:

$$(2-3) \quad V_{OFF} = V_{EXC} \times \frac{R_B}{R_B + R_A} = V_{EXC} \times K_{OFF}$$

Където K_{OFF} е коефициента на делителя.

Напрежението V_{OUT} се явява входящо за аналогово-цифровия преобразувател, който го преобразува в число N . Това число е свързано с входното напрежение чрез следната зависимост:

$$(2-4) \quad N = \frac{V_{IN}}{V_{REF}} (2^n - 1)$$

Където:

- V_{IN} е входното напрежение на АЦП
- V_{REF} е опорното напрежение на АЦП
- n е разрядността на АЦП

От където за разглеждания пример на фигура 2-1 и при условията по-горе, за N получаваме:

$$(2-5) \quad N = \left(\frac{V_{EXC} \times K_R \times K_A}{V_{REF}} + \frac{V_{EXC} \times K_{OFF}}{V_{REF}} \right) (2^n - 1)$$

Ако напрежението с което захранваме моста е и опорно за АЦП, то получаваме:

$$(2-6) \quad N = (K_R \times K_A + K_{OFF})(2^n - 1)$$

От полученото следва, че при такава конфигурация резултатът от преобразуването не зависи от опорното напрежение на АЦП и няма да се влияе от неговата нестабилност.

Като допълнение към горното, при изграждането на измервателния преобразувател се вземат предвид и изискванията за бързодействие и ниска консумация (виж 4.1). Токът през платинения терморезистор също така е и основен източник на грешка причинена от самонагриване. Съгласно закона на Джаул-Ленц, отделеното количество топлина в даден проводник е произведението от квадрата на тока, съпротивлението на проводника и времето за протичане на тока:

$$(2-7) \quad Q = I^2 R t$$

Мостовата схема дава възможност да се подобрят и тези характеристики, ограничавайки тока през измервателния мост чрез подходящ подбор на стойностите на R_1 и R_2 . Ограничаването на времето за работа на схемата посредством методите описани в 4.2.1, допълнително спомагат за подобряване на тези характеристики.

2.1.2 *Определяне на калибрационна характеристика*

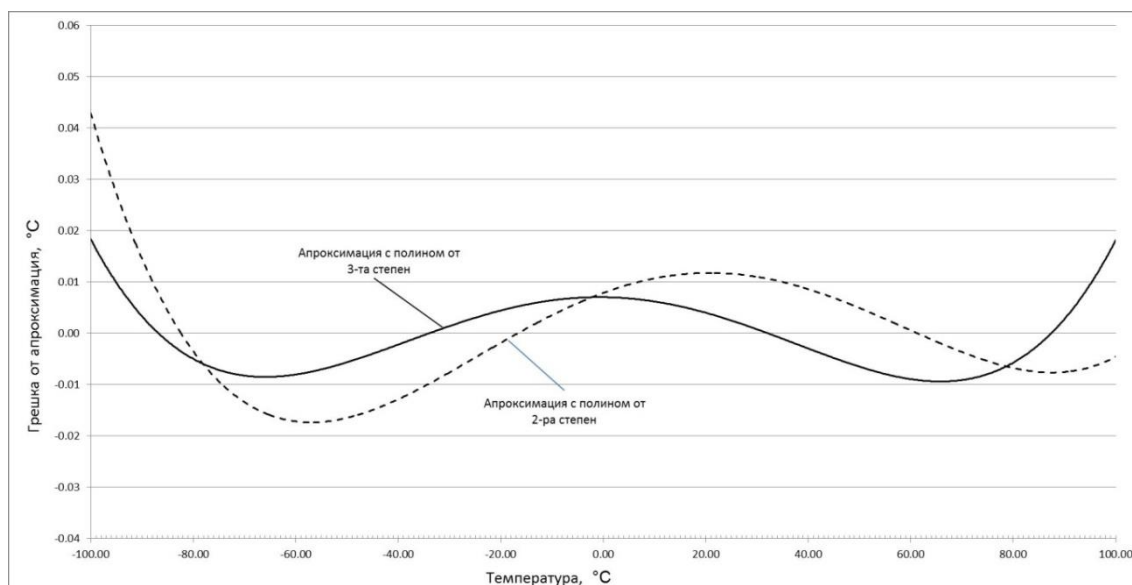
Платинените терморезистори позволяват да се постигне по-висока точност на измерване в сравнение с термодвойките и полупроводниковите сензори. Същността на този тип сензори налага прилагане на калибровъчна процедура за определяне характеристиката на преобразуване на измервателния канал.

Първата част от този процес включва теоретичното определяне на зависимостта на съпротивлението на сензора от температурата му – $t_{Pt100} = f(R_{Pt100})$. За тази цел се реферираме към стандарта, който предоставя в табличен или аналитичен вид зависимостта $R_{Pt100} = f(t_{Pt100})$. Чрез апроксимация (или друг аналитичен метод) се извежда необходимата за

калибрирането обратна функция. За температури под 0°C стандартът препоръчва използване на полином от 3-та степен, а за температури над 0°C – полином от 2-ра степен.

От практична гледна точка е по-удобно използването на един полином за целия обхват, но трябва да се има предвид, че това води до увеличаване на грешката от апроксимация на реалната характеристика на сензора. Колкото по-тесен е температурният обхват, толкова по-малка е тази грешка. Добре е тя да бъде оценена според конкретния случай. Ако грешката не надхвърля някаква приемлива стойност, за опростяване може цялата характеристика да се апроксимира с един полином от по-ниска степен.

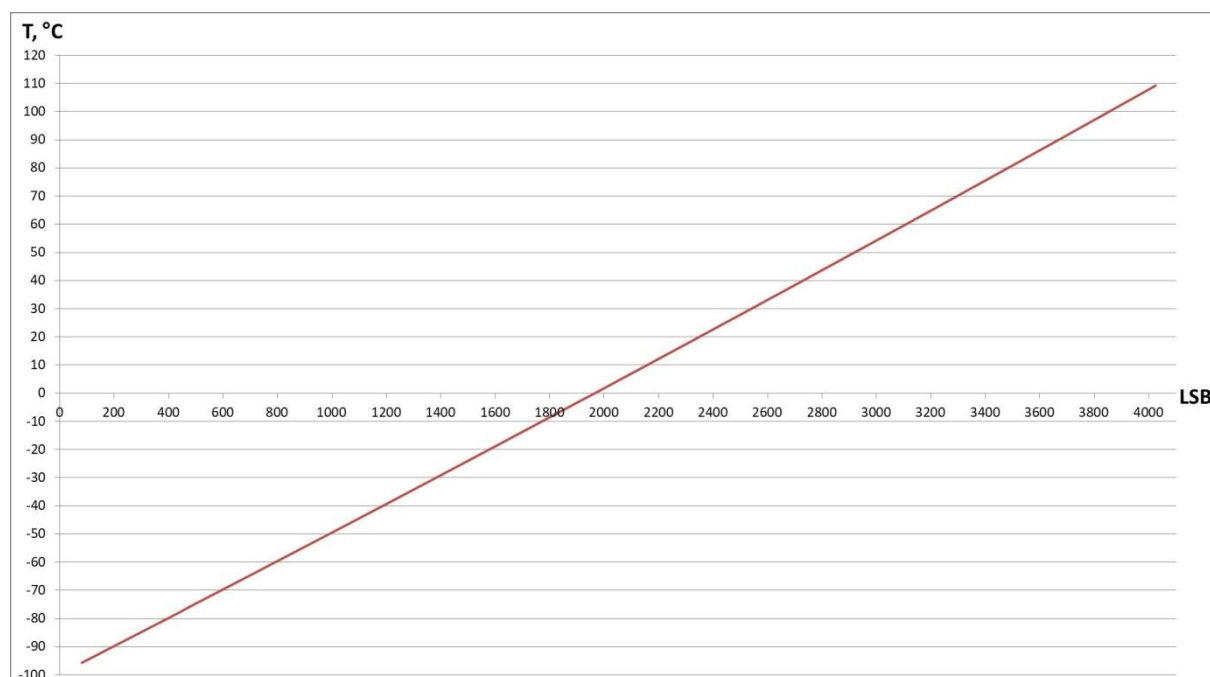
За да се оцени ефективността на апроксимацията с полиноми от различни степени се извършва преизчисляване на температурата по табличните стойности на съпротивленията съответно чрез полином от 2-ра и от 3-та степен. На фигура 2-2 е показана грешката от апроксимация на характеристиката $t_{Pt100} = f(R_{Pt100})$, съответно с полином от 2-ра и 3-та степен за температурен интервал от -100°C до $+100^{\circ}\text{C}$. Обхватът е избран така, че да покрива обхвата на метеорологичните измервания (от -80°C до $+60^{\circ}\text{C}$).



фигура 2-2 – Грешка от апроксимация на характеристиката на Pt100

От графиката можем да заключим, че за избрания температурен диапазон няма съществени разлики между апроксимирането с полином от 2-ра и от 3-та степен. И в двата случая грешката от апроксимация е незначителна спрямо други фактори ограничаващи точността на измерването. Като заключение избираме апроксимиращ полином от 2-ра степен за целия обхват.

Калибрирането продължава, като на входа на измервателния канал се задават m на брой стойности R на съпротивления от измервателния обхват посредством еталонни резистори. Отчитат се n на брой показания на АЦП. Чрез вече избрания апроксимиращ полином се определят съответстващите температури на зададените съпротивления R . От получените точки се построява предавателната характеристика на измервателния канал – $t_{Pt100} = f(N_{ADC})$, показана на фигура 2-3.



фигура 2-3 – Калибровъчна функция на измервателния канал

Като резултат е получено квадратно уравнение на измерената температура като функция от N :

$$(2-8) \quad t_{Pt100} = 0,000000562 \times N_{ADC}^2 + 0,049626899 \times N_{ADC} - 99,689997346$$

Коефициентът на детерминация за полученото уравнение е съответно:

$$(2-9) \quad R^2 = 0,999999798$$

Този резултат обезсмисля търсенето и използването на полином от висока степен.

Чрез намиране на зависимостта $t_{Pt100} = f(N_{ADC})$ се отстраняват и грешки присъщи на аналоговата измервателна система като: постояннотоково отместване, нелинейност на предавателната характеристика на измервателният мост, нелинейност на АЦП и др.

2.1.3 Калибриране по точка на замръзване на водата

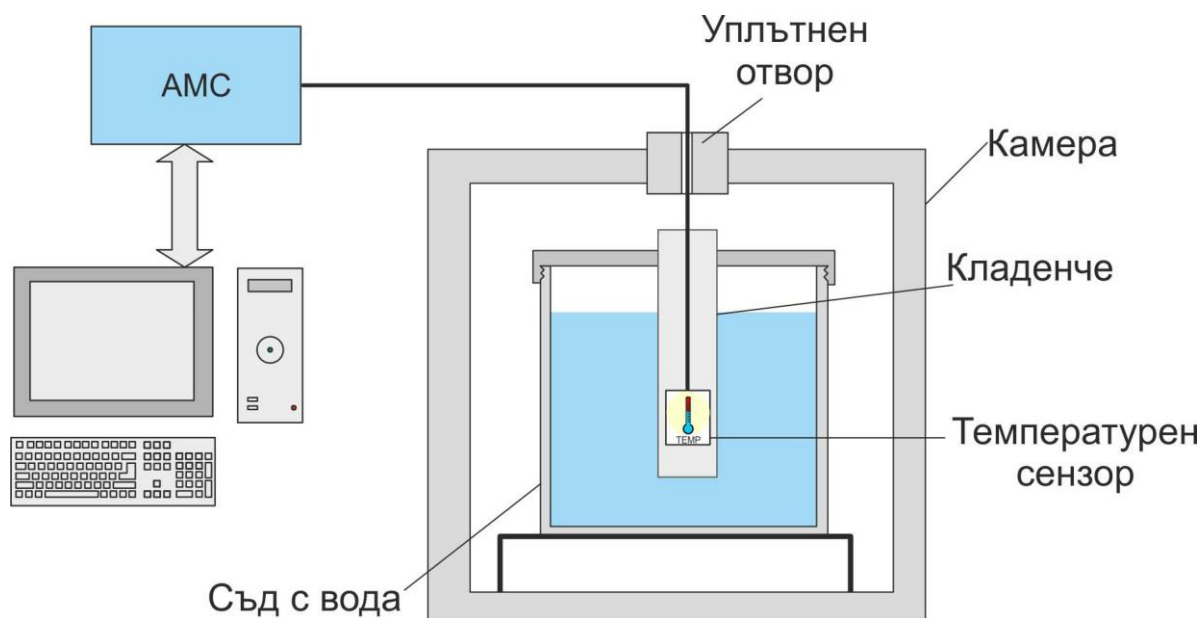
Съгласно стандарта толерансите на платинените сензори клас В са $\pm(0,3^\circ\text{C} + 0,005|t|)$. Това означава, че при измерване на температура 50°C , неточността дължаща се на сензора може да достигне $0,55^\circ\text{C}$. Ако се направи калибриране в една контролна точка от измервателният обхват (например в 0°C), това би отстранило началната неточност на сензора от $0,3^\circ\text{C}$, а резултатът ще доведе до двойно намаляване на грешката в измервателния обхват.

За тази цел се извършват измервания в контролни точки с предварително известни температури. Най-удобни контролни точки обикновено са температурите на фазовите преходи и тройните точки на кристалните вещества, тъй като те са добре известни и остават постоянни по време на целия преход.

Международната система единици (SI) определя мащаба и единица за термодинамична температура с помощта на температура на тройната точка на водата като втора отправна точка. По исторически причини температура на тройната точка на водата се определя на $273,16 \text{ K}$ или $0,01^\circ\text{C}$ при $611,657 \text{ Pa}$. Постигането на толкова ниско налягане, без специална апаратура, е относително трудна задача. Значително по-лесно е измерването на температурата на замръзване на водата, която е определена като вторична контролна точка от ITS-90. Тя е определена на $273,15 \text{ K}$ при

стандартно атмосферно налягане (101,325 kPa). Удобството в случая се състои в това, че зависимостта ѝ от налягането е много слаба – от 611,657 Pa до 101,325 kPa температурата на замръзване се изменя със само 0,01 K.

На фигура 2-4 е показана разработената постановка за калибриране на температурен сензор при точката на замръзване на водата.



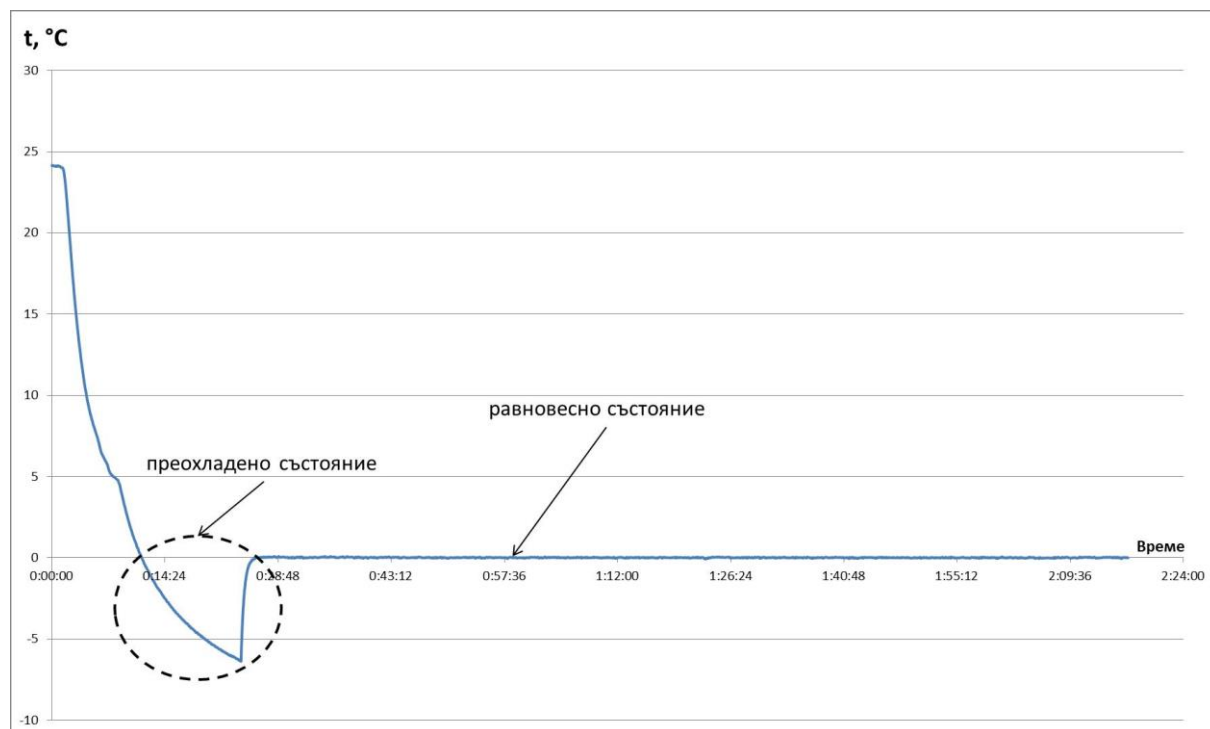
фигура 2-4 – Опитна постановка за калибриране при точката на замръзване на водата

Опитната постановка най-общо представлява температурна камера с възможност за поддържане на отрицателна температура. В нея е поставен херметически затворен съд с дестилирана вода, в която е потопен температурният сензор.

Температурата на водата преди поставянето ѝ в камерата е около 24°C. Започва равномерно охлаждане, което зависи от температурата в камерата, количеството вода, топлообменните свойства на съда и т.н. Характерно за процеса е, че температурата на водата пада под 0°C преди да започне да замръзва – водата е в преохладено състояние. При достигане на температурата на фазовия преход в обема на съда започват да се формират кристализационни центрове. Температурата се установява в равновесно

състояние до замръзване на целия обем вода, след което при по-нататъшно охлаждане температурата на леда започва да се понижава.

Данните от калибровъчното измерване са представени на фигура 2-5.



фигура 2-5 – Резултати от калибрирането на Pt100

Температурата по време на процеса е изключително стабилна и чрез нея се определя началната неточност на температурния сензор. Отчетената неточност се залага като коефициент на корекция за конкретния температурен сензор.

В заключение може да се отбележи, че описаният метод е относително лесен за прилагане и изключително надежден. Резултатът от направената калибровка е подобряване на точността на сензора с $0,19^{\circ}\text{C}$.

2.2 Измерване на температура с TMP112

TMP112 е цифров температурен сензор от полупроводников тип, с вграден 12 разряден АЦП и разделителна способност от 0,0625°C [100]. Точността на сензора според спецификацията на производителя е $\pm 1^\circ\text{C}$ за целия работен температурен диапазон от -40°C до 125°C , като е предложена методика за нейното подобряване чрез калибриране на сензора.

Съгласно характеристиките предоставени от производителя точността за отделни температурни диапазони се определя чрез уравнение:

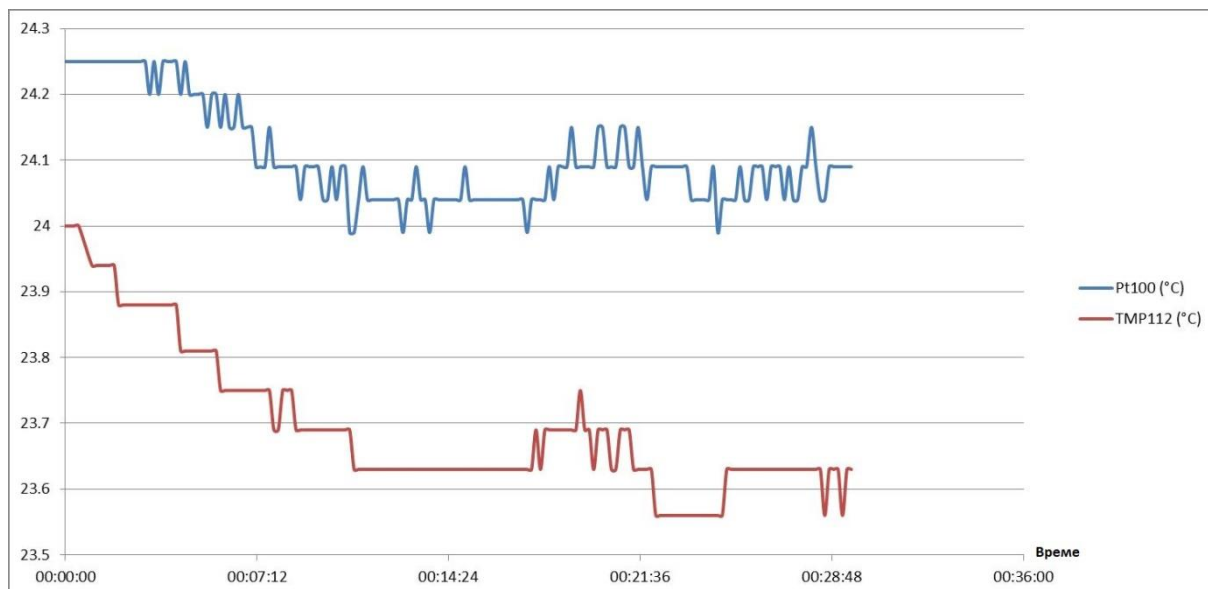
$$(2-10) \quad A = A_{(25^\circ\text{C})} + \Delta T \times S$$

Където A е максималната точност в диапазона ΔT , $A_{(25^\circ\text{C})}$ е точността при температура 25°C , а S е коефициента на температурна грешка за температурния интервала. Производителят дефинира три температурни интервала (-40°C до 25°C ; 25°C до 85°C ; 85°C до 125°C) и предоставя техните апроксимирани коефициенти.

От (2-10) се вижда, че част от грешката се дължи на точността на сензора при температура 25°C – $A_{(25^\circ\text{C})} = \pm 0,3^\circ\text{C}$. Тази точност може да бъде подобрена чрез калибриране на сензора в тази точка.

Най-близката фиксирана контролна точка от стандарта е тройната точка на феноксибензена – $26,864^\circ\text{C}$. Такова калибриране обаче би изисквало сложна апаратура, което би усложнило процеса твърде много. Калибрирането може да стане най-лесно при стайна температура чрез използване на термометър със значително по-добра точност (например Pt100 от 2.1). Това ще доведе до подобряване на точността в тази точка до точността на калибровъчния термометър и съответно за целия измервателен диапазон точността ще се подобри до $\pm 0,75^\circ\text{C}$.

На фигура 2-6 е показана калибровъчната графика на TMP112 спрямо платинения сензор.



фигура 2-6 – Резултати от калибрирането на TMP112

Съгласно така направената калибровка, функцията на преобразуване на температурата за този сензор придобива вида от уравнение .

$$(2-11) \quad t = N \times 0,0625 + 0,25$$

Където N е числото получено от АЦП на сензора.

Трябва да се има предвид, че отрицателните стойности на температурата за този сензор се кодират в обратен код, поради което е необходимо да се извършат съответните преобразувания за получаване на валидни стойности за N при отрицателните температури.

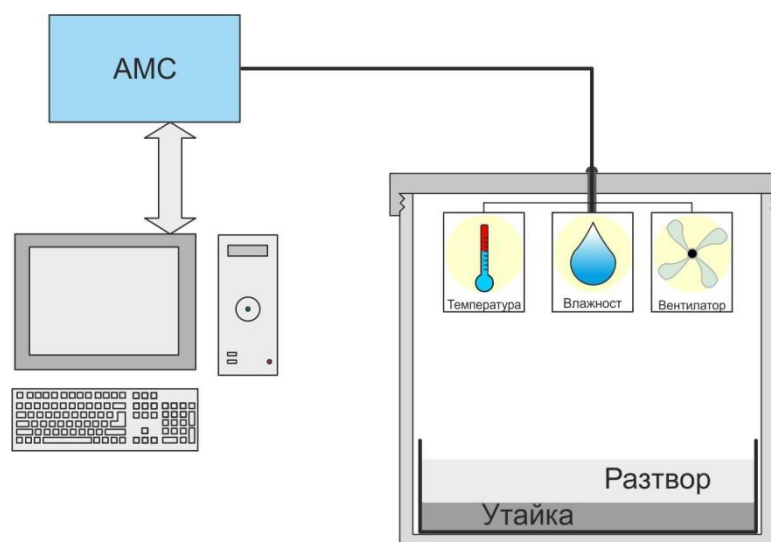
2.3 Измерване влажност на въздуха с HDC1080

HDC1080 е цифров сензор за относителна влажност с разделителна способност от 0,1%, интегриран температурен сензор, 14 разряден АЦП и точност от $\pm 4\%$ за целия измервателен диапазон от 0% до 100% при работна температура от -20°C до $+85^{\circ}\text{C}$ [101].

Съгласно предоставената от производителя характеристика за измервателния диапазон от 20% до 60% точността е $\pm 2\%$, за диапазон от 0% до 20% тя нараства до $\pm 3\%$, а за диапазон от 60% до 100% достига $\pm 4\%$. Калибровъчната функция на сензора е предоставена от производителя, но за подобряване на характеристиките сензорът може да бъде калибриран по контролна точка, с което да се отстрани началната неточност и тази породена от ефектите на стареене на полимера.

2.3.1 Калибриране на сензор за влажност

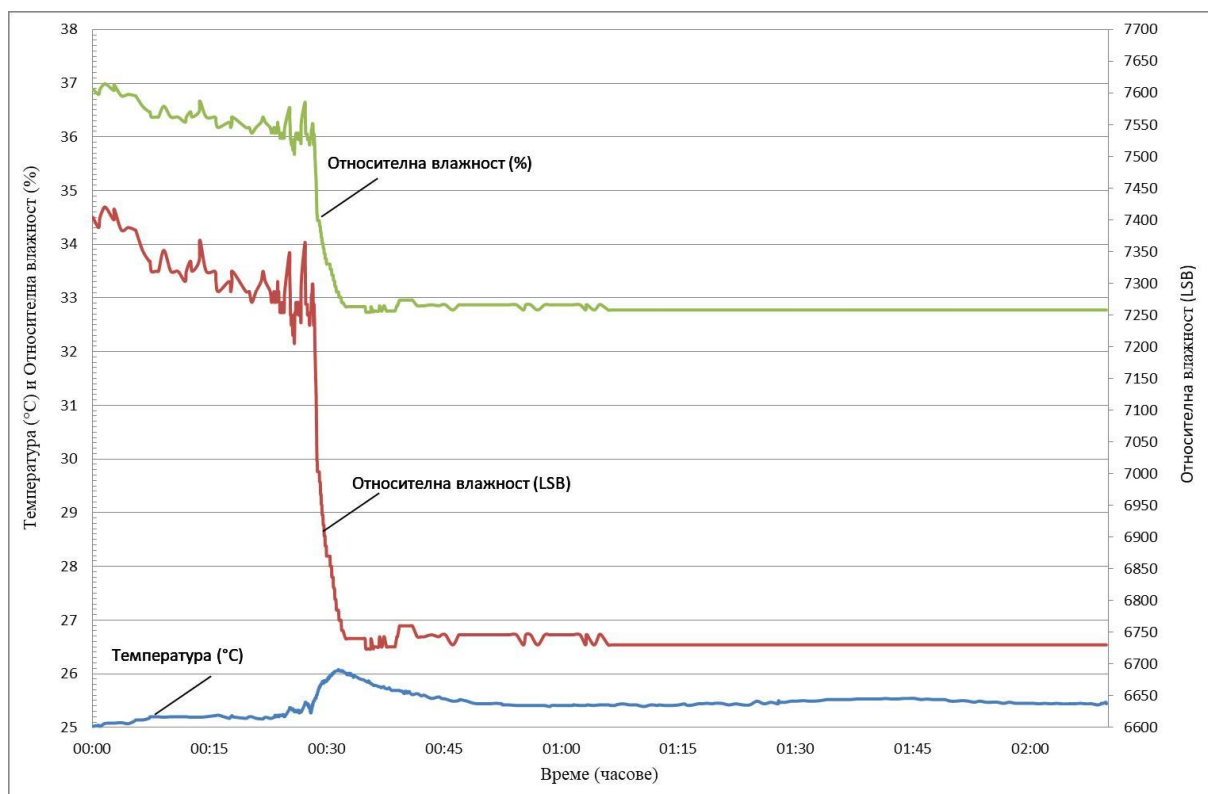
Методът за калибриране на влажността се основава на факта, че изолирани от околната среда обеми въздух и наситени разтвори на соли постигат равновесие при точно дефинирана стойност на относителната влажност при зададена температура (контролна точка). На фигура 2-7 е показана схематично опитната постановка за калибриране на сензора за влажност.



фигура 2-7 – Опитна постановка за калибриране на сензор за влажност

Стойността на контролната точка зависи силно от вида на солите и температурата при която се достига равновесното състояние на системата. Изборът на соли става по две основни характеристики. Първо, контролната точка трябва да е в онази част от работната характеристика, която съдържа само началната неточност. В текущия случай това е областта от 20% до 60%. Второ, солите трябва да са с възможно най-малка зависимост от температурата, за да се избегне внасяне на грешка от температурния дрейф по време на калибрирането. Много подходящ за целта е магнезиевият хлорид ($MgCl_2$), чиято равновесна влажност е $32,8 \pm 0,2 \%$ при температура от $25^\circ C$) [73][22].

Постановката най-общо представлява херметически затворена и изолирана от околната среда камера, с уплътнен отвор за кабелите. В нея е поставен съд с наситен разтвор на магнезиев хлорид, сензора за влажност и контролен термометър. Поставен е и малък вентилатор, който да подпомогне хомогенизирането на затворения въздух.



фигура 2-8 – Резултати от калибрирането на сензора за влажност

На фигура 2-8 са показани резултатите от калибрирането на сензора – стойностите получени от АЦП на дясната ос, а температурата и преизчислената стойност на относителната влажност с включен коригиращ коефициент са на лявата ос. Температурата по време на експеримента е поддържана между 25°C и 26°C. Равновесното състояние е достигнато при показание на АЦП от 6730 бита.

За привързване на показанията на сензора с контролната точка е използвана характеристиката предоставена от производителя, където по обратен ред е изчислен необходимият калибровъчен коефициент $K_h = -1360$ LSB. Така за калибрираната стойност на измерената влажност при равновесното състояние получаваме $H = 32,8\%$.

Извършено е контролно измерване на втора контролна точка (NaCl, $75.3 \pm 0.2\%$ при 25°C). Измерената влажност при достигане на равновесно състояние е 13721 бита (75,4% изчислено с компенсираното уравнение).

В заключение може да се каже, че сензорът има отлични измервателни характеристики, но трябва да се има предвид, че привързването към контролната точка става за сметка на част от измервателния диапазон.

2.4 Измерване на атмосферно налягане с BMP180

BMP180 е цифров сензор за атмосферно налягане от пиезо-резистивен тип с резолюция от 0,01 hPa. Максималната грешка за целия измервателен диапазон от 300 до 1100 hPa, при работни температури от -20°C до 65°C , е $\pm 6,0$ hPa. Производителят предоставя калибровъчната функция за изчисляване на налягането от получения резултат, заедно с необходимите калибровъчни коефициенти. Функцията включва и компонента на температурна компенсация, което дава възможност тя да бъде направена с данни от по-точен сензор.

Съгласно спецификацията на производителя, за измервателен диапазон от 300 до 1100 hPa при температура от 25°C , грешката на сензора е ± 4 hPa. Тази грешка може да бъде компенсирана чрез прилагането на подходящ калибровъчен процес.

Калибрирането на сензор за налягане обикновено изисква използване на скъпа и сложна апаратура, което предвид целта на използване и оставащата неточност на сензора е неоправдано. Вместо това би било по-подходящо използването на по-прост метод за калибриране, който значително да намали първоначалната грешка, макар и да не я премахва напълно. За целта е удобно да се използват фиксирани точки от равновесните криви на кристални вещества, като например температурата на кипене на водата.

2.4.1 Калибриране налягането по температурата на кипене на водата

Температурата на кипене на водата зависи силно от налягането. Това предлага възможност за калибриране на сензора за налягане посредством измерване на температурата на кипене на водата при атмосферно налягане. За да установим налягането на кипене на водата при конкретна температура използваме уравнението на Клепейрон-Клаузиус:

$$(2-12) \quad \frac{dP}{dT} = \frac{L}{T\Delta v}$$

Където L е специфичната топлина на изпарение, T е температурата, P е налягането, а Δv е промяната в специфичния обем по време на фазовия преход.

При температури и налягане много по-ниски от критичната температура на веществото (критичната температура на водата е $373,946^\circ\text{C}$ при налягане от $22,064\text{ MPa}$), може да се приеме че:

- Специфичният обем на газовата фаза е значително по-голям от този на течната ($v_g \gg v_c$)
- Газовата фаза може да се разглежда като идеален газ ($v_g = RT/P$)

Следователно:

$$(2-13) \quad \Delta v = v_g \left(1 - \frac{v_c}{v_g}\right) \approx v_g = \frac{RT}{P}$$

От където при заместване в (2-12) и преобразуване получаваме:

$$(2-14) \quad \frac{dP}{dT} = \frac{PL}{T^2R} \rightarrow \frac{dP}{P} = \frac{L}{R} \frac{dT}{T^2}$$

Ако приемем че за малки температурни интервали специфичната топлина на изпарение е константа, тогава интегрирането на (2-14) следва да бъде:

$$(2-15) \quad \int_{P_1}^{P_2} \frac{dP}{P} = \frac{L}{R} \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T^2} \rightarrow \ln \frac{P_2}{P_1} \cong \frac{L}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)$$

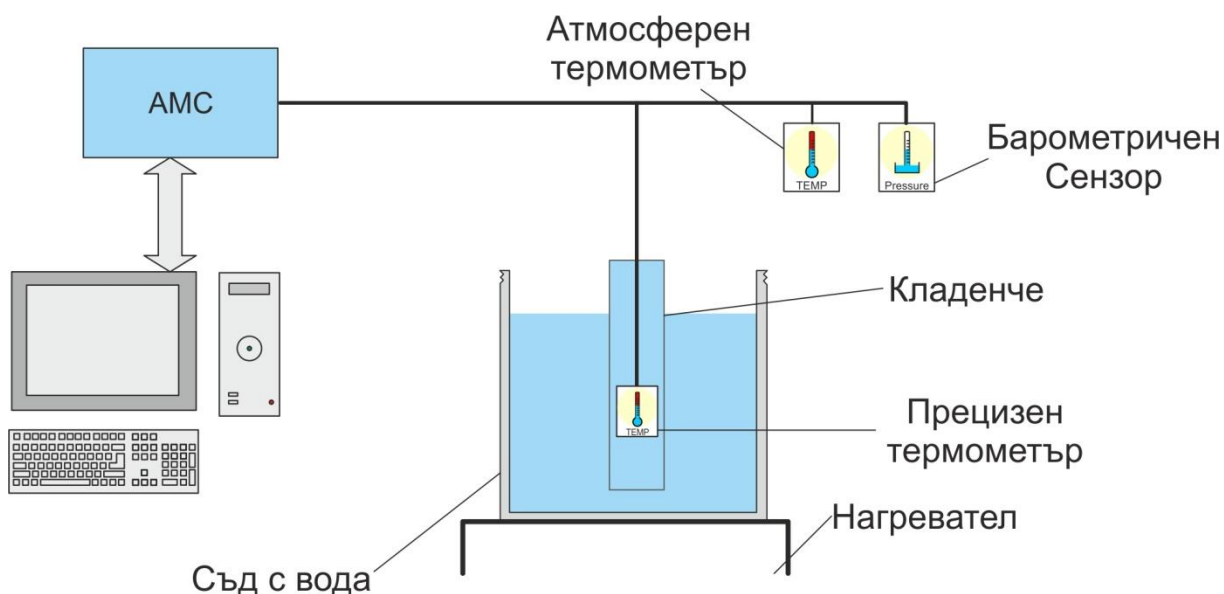
От където можем да определим налягането на кипене на водата при дадена температура както следва:

$$(2-16) \quad P_1 = \frac{P_2}{e^{\frac{L}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)}}$$

Където:

- Специфична топлина на изпарение е $L = 40660\text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}$
- Универсалната газова константа е $R = 8,314472\text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
- Нормалното налягане $P_2 = 1013,25\text{ hPa}$
- Температурата на кипене на водата при P_2 е $T_2 = 100^\circ\text{C}$
- Температурата при извършване на експеримента е $T_1, ^\circ\text{C}$

На фигура 2-9 е показана схематично опитната постановка за калибриране на сензора за налягане.



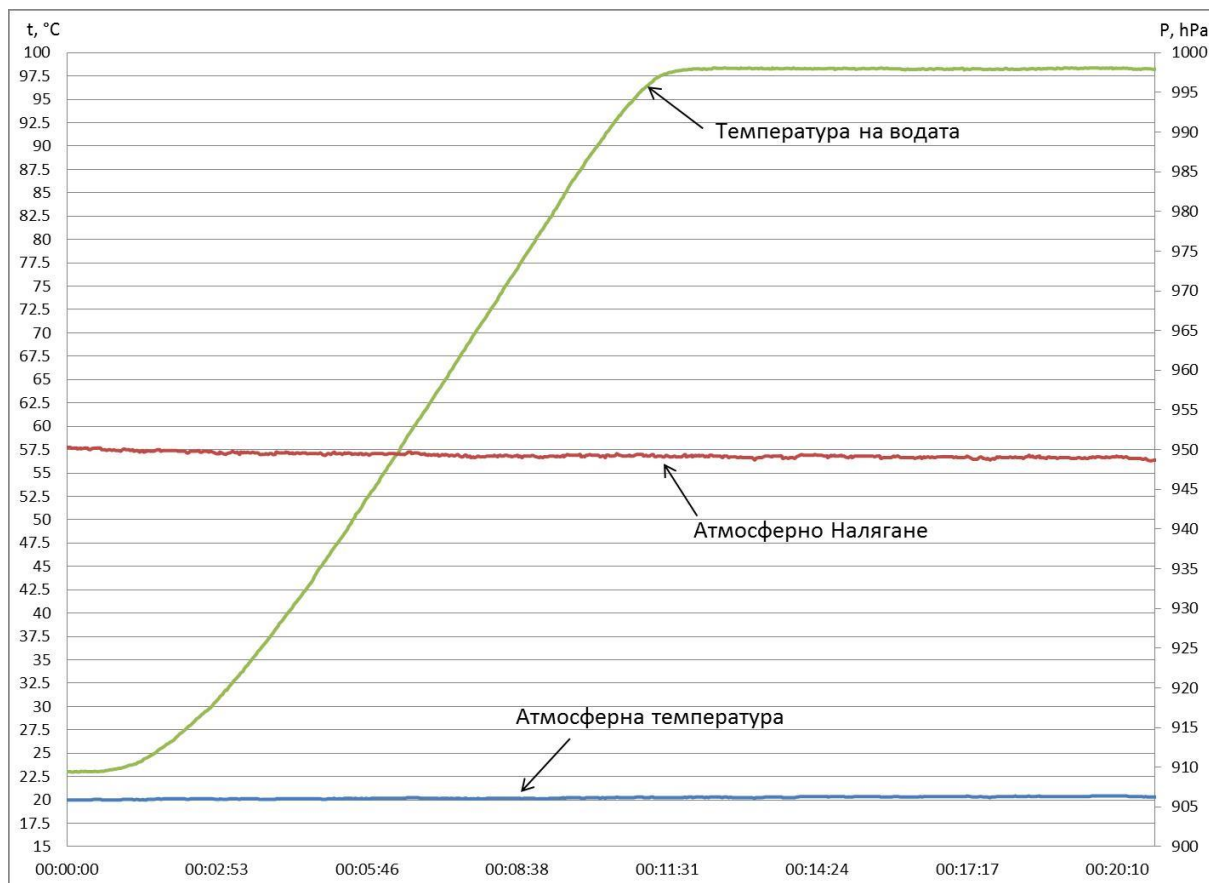
фигура 2-9 – Опитна постановка за калибриране на сензор за налягане

Опитната постановка най-общо представлява отворен съд с дестилирана вода, която се нагрява от нагревател. В него е поставен прецизен термометър за измерване на температурата на кипене на водата, който е свързан към измервателна система. Барометричният сензор се поставя свободно към атмосферния въздух, така че да не се влияе от температурата на нагревателя. Към системата е включен още и термометър за измерване на атмосферната температура, поставен в непосредствена близост до барометричния сензор. Данните от този термометър се използват за температурна компенсация на барометричния сензор.

Водата в съда се нагрява от стайна температура до кипване. Когато се достигне температурата на кипене на водата, данните от сензорите се снемат и се извършват съответните преобразувания.

Отчетената температура при извършване на експеримента е $T_1 = 98,28^{\circ}\text{C}$. При решаване на (2-16), за атмосферно налягане при експерименталните условия получаваме $P_1 = 953,48 \text{ hPa}$.

Данните от калибровъчното измерване са представени на фигура 2-10.



фигура 2-10 – Резултати от калибрирането на BMP180

Отчетеното налягане по време на експеримента е $P_1 = 949,1 \text{ hPa}$, което предполага използването на коригиращ коефициент $K_p = 4,38 \text{ hPa}$.

От уравнението се вижда, че резултата е в много силна зависимост от температурата, което предполага внасянето на грешка в зависимост от точността на използвания термометър. Така при измерване на температурата с грешка от $\pm 0,05^\circ\text{C}$, грешката за полученото налягане ще е $\pm 1,7 \text{ hPa}$. Този резултат обаче е значително подобрение на началната грешка на сензора, а предложеният метод е изключително прост и не изисква специализирана апаратура.

2.5 Постигнати резултати

1. Изследвани са източниците на грешки при измерване на температура с терморезистори Pt100. Аналитично е изследвано влиянието на степента на апроксимиращия полином върху точността на привързване на скалата. Предложена е процедура за повишаване точността на калибрирането чрез привързване към контролна точка. Проведени са експерименти с реална апаратура, специално създадена за целта, за проверка на изведените зависимости. Получените експериментални данни добре се съгласуват с аналитично получените резултати.
2. Изследвани са източниците на грешки при измерване на температура с цифров сензор TMP112. Предложена е процедура за повишаване точността на сензора чрез привързване към показание на контролен термометър. Данните от извършените експерименти потвърждават приложимостта на предложената процедура за повишаване на точността.
3. Изследвани са възможностите на цифров сензор за влажност HDC1080. Предложена е процедура за калибриране на сензора чрез привързване към контролна точка. Проведена е калибровка на сензора чрез прилагане на предложената процедура, приведени са получените експериментални данни.
4. Изследвани са възможностите на цифров сензор за атмосферно налягане BMP180. Предложен е метод за повишаване точността на сензора чрез привързване към фиксирана точка от равновесната крива на водата. Приложени са данни от експерименталните изследвания.

3 Измерване параметрите на вятъра

В глава 3 е разгледан алтернативен метод за дълговременно измерване на параметрите на вятъра при екстремни условия.

Цел на изследването е да се потърси такъв физичен принцип, който да позволи изграждането на анемометър, без сложна механична конструкция с движещи се или лесно блокиращи се функционални компоненти.

3.1 Аеродинамични сили

За целите на изследването можем да разглеждаме вятъра като вискозен флуид обтичащ неподвижно твърдо тяло с определена скорост и посока. Следователно флуидът ще въздейства на тялото с аеродинамична сила, чиято големина зависи от формата на тялото и скоростта на флуида [12][2].

При подбор на подходяща форма на тялото може да се елиминира появата на подемна сила, оставяйки тялото на влиянието единствено на челното съпротивление. Ако тялото е в състояние да измери тези сили, то ще можем да определим еднозначно скоростта и посоката на вятъра.

Тъй като очакваната скорост на вятъра е в порядъка от 1 до 100 m/s, а характерният размер на измервателния уред е над 10 cm, то за критерия на Рейнолдс получаваме:

$$(3-1) \quad Re = \frac{vl\rho}{\mu} \approx 10^3 \dots 10^5$$

където:

- v – средна скорост на флуида (1 до 100 m/s),
- l – характерен размер на тялото (над 10 cm),
- μ – динамичен вискозитет на въздуха (18,5 $\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$),
- ρ – приземна плътност на въздуха (1,225 kg/m³).

Този резултат предполага разглеждането на вятъра като турбулентен поток, а силата върху тялото ще се определи от уравнението за аеродинамичния натиск:

$$(3-2) \quad \vec{F} = \frac{1}{2} C_{\rho} S \vec{V}^2$$

Където:

- ρ – е плътността на въздуха;
- S – площта от напречната проекция на тялото.
- C – коефициент на челното аеродинамично съпротивление;
- v – скоростта на обекта спрямо флуида.

Другите сили на съпротивление при движение, като например повърхностното триене, ще са значително по-малки и могат да се пренебрегнат. Следователно с преобразуване на уравнение (3-2), получаваме израз за скоростта на флуида като функция от силата на натиск:

$$(3-3) \quad \vec{V} = \sqrt{\frac{2\vec{F}}{C_{\rho}S}}$$

Коефициент на челното аеродинамично съпротивление (C) е безразмерна величина и зависи от формата на конструкцията и обтекаемостта на тялото. Ако конструкцията на измервателният уред е такава че C и S са еднакви от всички посоки на обтичане, това би позволило те да бъдат определени много прецизно и разглеждани като калибрационни константи.

Макар скоростта на вятъра да е тримерна векторна величина, съгласно указанията на световната метеорологична организация [86], приземните ветрове могат да се разглеждат като двумерни векторни величини. Това дава възможност за опростяване на конструкцията на измервателният уред, ограничавайки изискванията за еднаквост на формата само за две измерения на тялото.

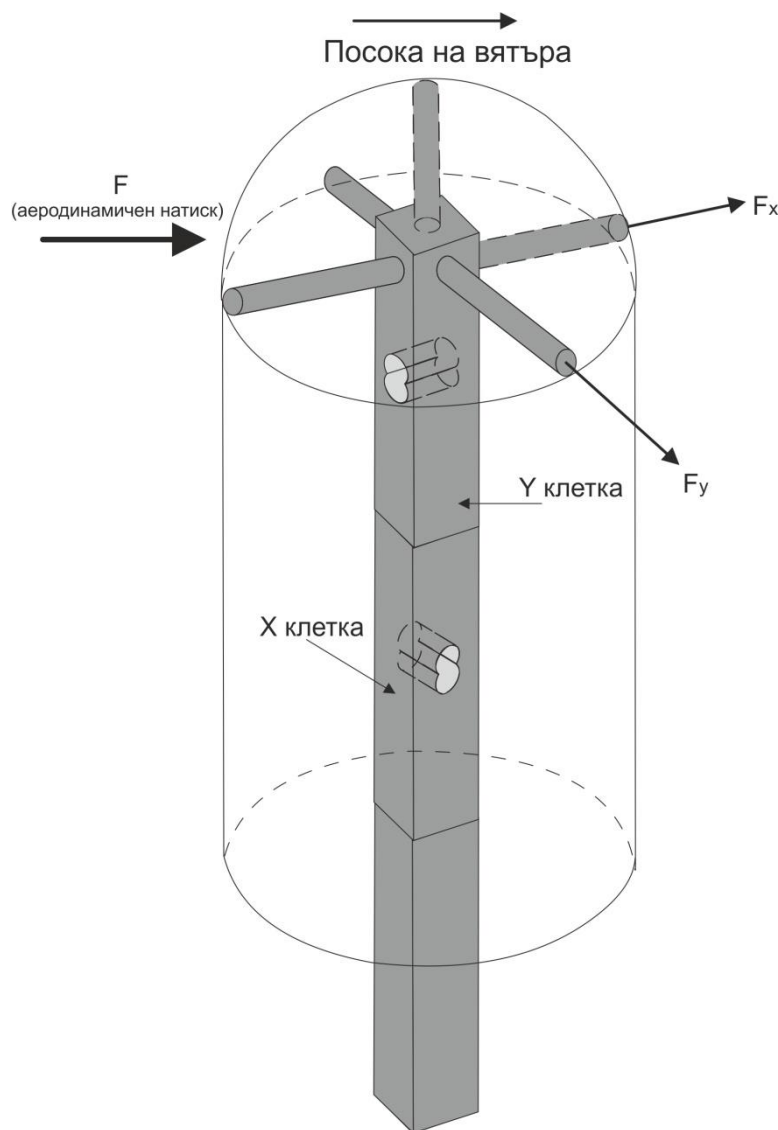
3.1.1 Конструктивни особености

Удобни за измерване на аеродинамичните сили са тензорезисторите. Относително високото ниво на изходния сигнал и възможност за конфигуриране в мостова схема, предимствата на която бяха разгледани по-рано, дава възможност за конструирането на сензор с двудименсионна измервателна скала и относително ниска консумация. Допълнително предимство е, че този тип сензори са широко разпространени в индустрията като т. нар. товарни клетки. Те са евтини, имат висок клас на защита, конфигурирани са в схема на пълен мост, с много близки параметри, широк работен температурен диапазон и разнообразна гама от обхват и форми.

Използването на два такива тензорезистивни сензорни елемента в конструкция с взаимно перпендикулярни оси на чувствителност, дава възможност да се изгради двудименсионен сензор, способен да регистрира големината и посоката на приложената сила в пълния обхват от 360° на разглежданото двуизмерно пространство.

При конструирането на сензора обаче трябва да се вземат под внимание и някои особености на товарните клетки – тяхната форма е изключително подходяща за измервания по една ос. Когато обаче се разглежда структурата в пълния обхват от 360° на разглежданото двуизмерно пространство, формата им не отговаря на поставеното условие за еднаквост на обтекаемостта положено по-горе. Поради което се налага изграждане на обвивка около сензора с необходимата форма. Това обаче не е недостатък тъй като тази обвивка, освен функция за равномерно предаване към сензорите на приложената в пълен 360° обхват сила, ще изпълнява и условието за защита на сензорите от влиянието на околната среда – замръзване, замърсяване, слънчева радиация и т.н. Нещо повече – наличието на външна защитна обвивка дава възможност за моделиране на параметрите C и S според нуждите на системата, без това да оказва

влияние върху цената на товарните клетки. Тъй като силата е право пропорционална на тези параметри, те могат да бъдат използвани за да дефинират граничните стойности на въздействие върху товарните клетки, а от там и подобряване на чувствителността на сензора. Примерен модел на такъв сензор е показан на фигура 3-1.



фигура 3-1 – Модел на тензометричен анемометър

Структурата е изградена от основен прът, който е неподвижно закрепен в долната си част. В горната част на пръта са монтирани двете товарни клетки, като е спазено условието за перпендикулярност на осите на натоварване на всяка от тях. В горната част на пръта е закрепена неподвижно защитната обвивка, чиято форма представлява кух цилиндър с полусферичен капак. Основното изискване при тази конструкция пада

върху начина на закрепване на защитната обвивка към основната ос. То трябва да е такава, че независимо от посоката на приложената сила, да разпределя натоварването към клетките само по осите им на чувствителност.

Конструкцията по същество разлага приложената сила на натиск върху защитната обвивка на две взаимно перпендикулярни компоненти, всяка от които се измерва от товарна клетка в две направления на координатните оси. Това предполага, че предавателната функция на товарните клетки ще се изменя по синусов закон в зависимост от ъгъла на приложения аеродинамичен натиск.

Прилагайки питагоровата теорема върху предавателните функции на товарните клетки, лесно може да се изчисли големината на аеродинамичната сила:

$$(3-4) \quad \vec{F} = \sqrt{\vec{F}_x^2 + \vec{F}_y^2}$$

Посоката на аеродинамичната сила се определя чрез обратна тригонометрична функция:

$$(3-5) \quad \theta = \cos^{-1} \left(\frac{F_x}{F} \right) \text{ за } F_y \geq 0$$

$$\theta = 360 - \cos^{-1} \left(\frac{F_x}{F} \right) \text{ за } F_y < 0$$

От тук посредством уравнение (3-3) се определя скоростта на вятъра, а посоката му съвпада с посоката на аеродинамичната сила.

3.1.2 Влияние на плътността на въздуха (ρ)

От израз за скоростта на флуида като функция от силата на натиск (3-3) следва, че резултата от измерването ще е в директна зависимост от плътността на въздуха ρ .

Плътността на въздуха е параметър, който се изменя с температурата, влажността и налягането [90]. Плътността на сухия въздух може да се определи чрез уравнението на Клепейрон-Менделеев, изразено чрез моларната маса на веществото :

$$(3-6) \quad pV = \frac{m}{M}RT \rightarrow \frac{m}{V} = \frac{pM}{RT} \rightarrow \rho = \frac{pM}{RT}$$

където:

- p – налягането на газа,
- V – обема на газа,
- M – моларната маса на газа,
- m – масата на газа,
- R – универсалната газова константа,
- T – абсолютната температура,
- ρ – плътността на въздуха;

За да отразим влиянието на влажността, влажният въздух може да се представи като смес между идеалните газове на сухия въздух и водните пари. За целта абсолютното налягане (p) от уравнение (3-6) се представя като сума от парциалните налягания на сухия въздух (p_a) и водните пари (p_v):

$$(3-7) \quad \rho = \frac{p_a M_a + p_v M_v}{RT}$$

Парциалното налягане на водните пари се изчислява от налягането на насищане на водните пари (p_{sat}) и относителната влажност на въздуха (U):

$$(3-8) \quad p_v = U p_{sat}$$

Препоръчителният метод [86] за изчисляване на налягането на насищане на водните пари е чрез използване на модификация на уравнението на Магнус (t е температурата в $^{\circ}\text{C}$):

$$(3-9) \quad p_{\text{sat}} = 611.2e^{\frac{17.62t}{237.8+t}}$$

Грешката при изчисление на налягането на насищане на водните пари с този модел, сравнена с референтни таблични стойности, е по-малка от $\pm 0,3\%$. Това ни позволява да модифицираме уравнение (3-7) до вида:

$$(3-10) \quad \rho = \frac{pM_a + Up_{\text{sat}}(M_v - M_a)}{RT}$$

Респективно уравнение (3-3) придобива вида:

$$(3-11) \quad \vec{v} = \sqrt{\frac{2\vec{F}RT}{CS(pM_a + Up_{\text{sat}}(M_v - M_a))}}$$

Този теоретичен модел позволява да се направи оценка на влиянието на изменението на плътността на въздуха в зависимост от температурата, влажността и атмосферното налягане.

За целта се прави разглеждане на отделните променливи в целия работен диапазон. За температурата той е от -80°C до $+60^\circ\text{C}$. На фигура 3-2 са показани семейство характеристики отразяващи изменението на плътността на въздуха в температурния диапазон, при различна относителна влажност.

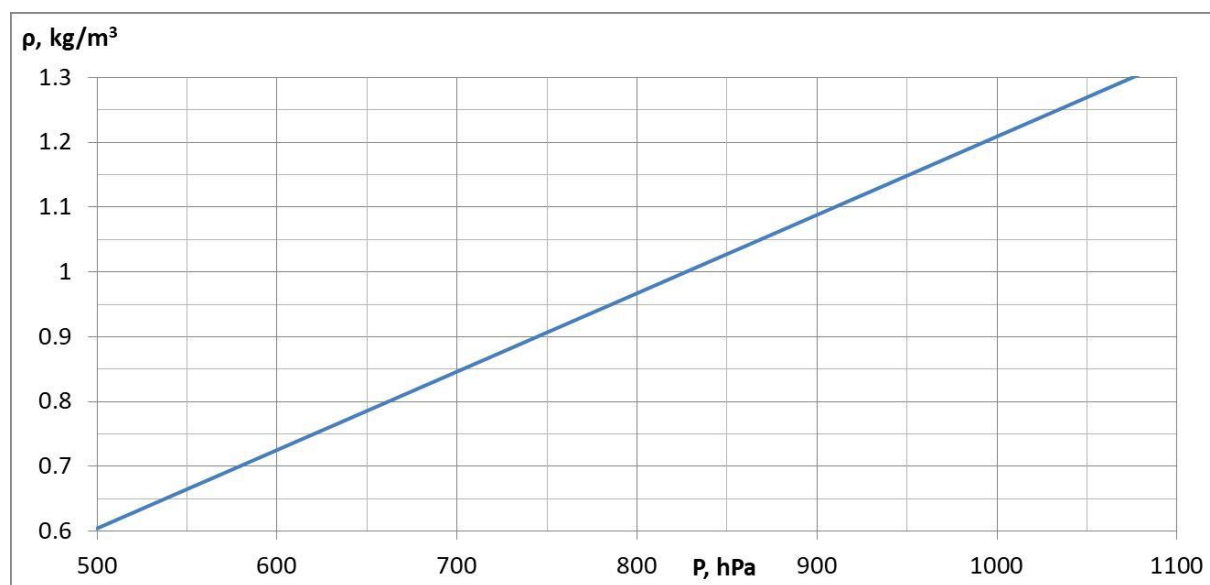


фигура 3-2 – Температурна зависимост на плътността на въздуха

Както се вижда от графиката, относителната влажност на въздуха започва да влияе на плътността му практически при температури над 0°C , където разликата между плътността на сухият въздух и на въздух с относителна влажност от 100% е едва $-0,23\%$. Тази стойност нараства с температурата, като при 60°C достига $-7,46\%$. Причината за намаляването на плътността на въздуха с повишаване на влажността е по-ниската моларна маса на водните пари (18 g/mol) спрямо тази на сухият въздух (28 g/mol). Тези резултати дават възможност ефекта на влажността да бъде пренебрегнат при по-малко прецизните измервания.

Температурният ефект върху плътността на въздуха обаче е значително по-голям – тя се увеличава приблизително с 1% за всеки 3°C спад в температурата. От това следва, че за целия температурен диапазон, аеродинамичният натиск може да се измени с до 50% . Този резултат показва значителното въздействие на температурата върху измерването и обуславя необходимостта от използване на контролен термометър при измерванията.

Влиянието на атмосферното налягане също е изследвано в целия работен диапазон – от 500 hPa до 1080 hPa . Получената характеристика е показана на фигура 3-3.



фигура 3-3 – Зависимост на плътността на въздуха от налягането

То също е значително – плътността на въздуха се увеличава пропорционално с приблизително 1% за всеки 10 hPa повишаване на налягането. Така за целия измервателен диапазон получаваме, че изменението може да достигне до 60%. Трябва обаче да се има предвид, че значителните отклонения в налягането са по-скоро в следствие на промяна в надморската височина, докато денонощните и сезонните изменения в атмосферното налягане са значително по-малки.

3.2 Тензометричен анемометър

Реализирането на описаната по-горе система се свежда до изграждане на механичната конструкция и подходяща електронна схема за регистриране и обработка на сигналите от тензорезисторите.

3.2.1 Механична конструкция

Особеност при изграждането на механичната конструкция е необходимостта елементите на конструкцията (товарните клетки, защитният кожух и основният прът) да са свързани така, че да предават приложената сила равномерно и без загуби. За целта при изграждането на конструкцията е използвана система от шпилки и втулки със специфични за целта размери и форма. Конструкцията трябва да се закрепва вертикално и неподвижно спрямо опората. Отклонението от вертикалната ос на закрепване ще повлияе директно върху измерените стойности.

Съгласно описаните в 3.1.1 конструктивни особености, аеродинамичните характеристики (C и S) на тялото се определят от формата на защитната обвивка. Размерите на защитната обвивка се съобразяват с типичните размери на товарните клетки – което предполага използването на алуминиева тръба с дължина 20 cm и външен диаметър 24 mm. От тези параметри се определят и аеродинамичните характеристики – коефициент на челно аеродинамично съпротивление от 1,2 [37] и площ на напречната проекция от $0,0048 \text{ m}^2$.

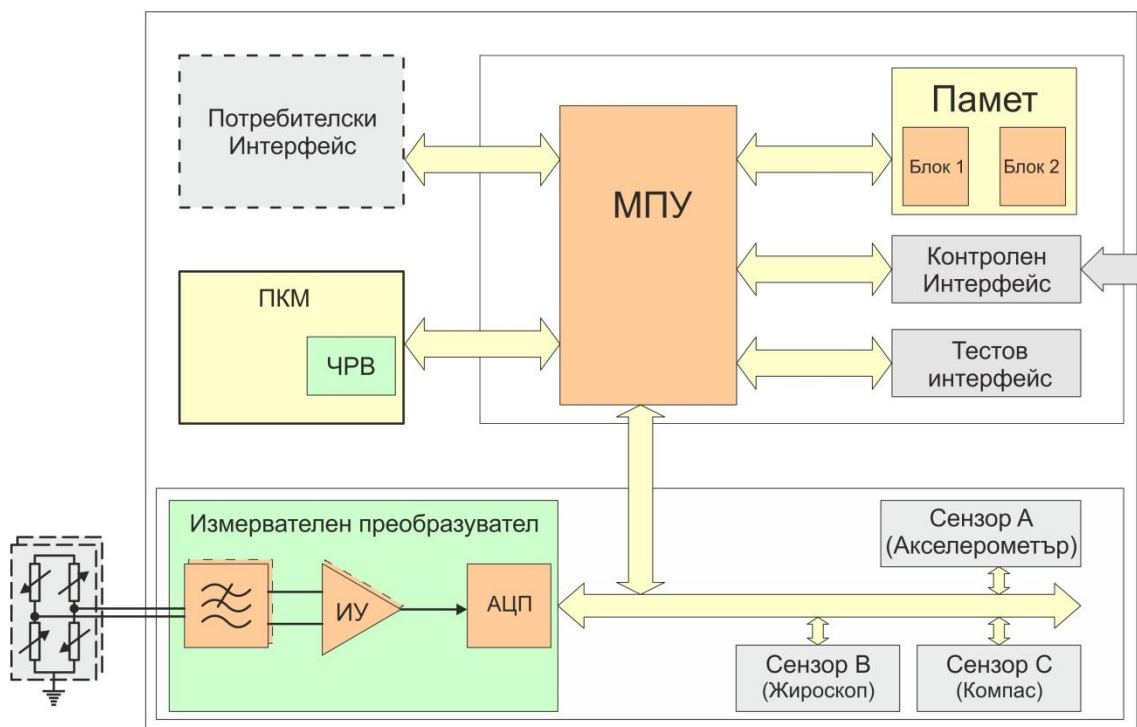
Тези параметри позволяват да се определят максималните натоварвания на системата. Посредством уравнение (3-2), при осреднена плътност на въздуха от $1,225 \text{ kg/m}^3$ и съгласно изискванията на Световната метеорологична организация за измерване на вятър с максимална скорост от 75 m/s , максималната сила приложена върху системата ще е $19,845 \text{ N}$. Този резултат предполага, че за финалната версия на системата би било подходящо използването на товарни клетки от 2 kg ($19,613\text{N}$).

Товарните клетки допускат безопасно претоварване от 150% и максимално механично претоварване от 200%. Използвайки същите преобразувания, тези характеристики означават, че системата би могла да се справи безпроблемно с пориви на вятъра до около 90 m/s, а механичните повреди в системата ще настъпят при пориви от над 100 m/s.

3.2.2 Електронно-измервателна система

За реализиране на измерването системата трябва да включва в структурата си измервателен преобразувател за снемане, обработка и цифровизиране на сигнала от тензорезисторите. Данните от измерването е необходимо да бъдат обработени и съхранени във вградена памет. Необходим е и подходящ интерфейс за прехвърляне на данните към персонален компютър или горно йерархично ниво на система за събиране на данни.

На фигура 3-4 е показана блоковата схема с основните компоненти, необходими за реализирането на тензометричния анемометър – сензорен блок, управляваща подсистема и подсистема за управление на мощността.



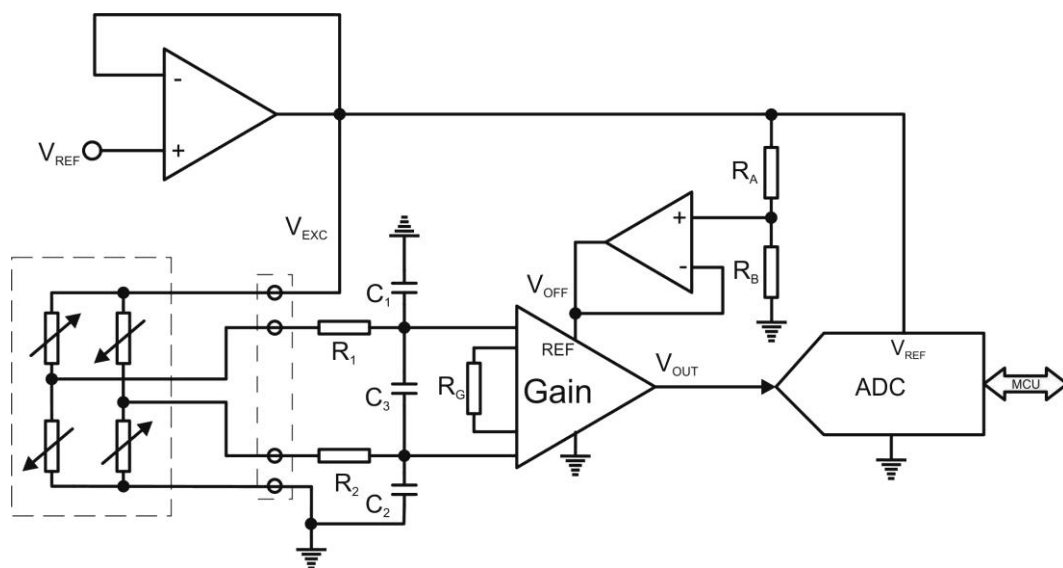
фигура 3-4 – Блокова схема на тензометричен анемометър

Специфичните условия на работа на системата налагат включването на подсистемата за управление на мощността. Тя включва всички необходими компоненти за минимизиране консумацията на системата и подsigуряване на дълговременната ѝ оперативна функционалност. Тук е включен и часовник за реално време, необходим за изработване на времеви маркери при дълговременна работа в автономен режим.

Управляващата подсистема включва микроконтролер, памет за съхранение на данни и интерфейсите за комуникация на системата с оператор и външна система.

Сензорният блок включва всички необходими компоненти на входния преобразователен блок и всички помощни сензори. Основните изисквания към параметрите на схемата се задават от характеристиките на товарните клетки и работните условията.

Съгласно предварителното уточнение по-горе, сензорите са изградени от стандартни товарни клетки – четири $1\text{-k}\Omega \pm 10\%$ тензорезистора свързани в конфигурация на пълен мост. Номиналният изходен сигнал за тези сензори е $1,0 \pm 0,15 \text{ mV/V}$, поради което се налага добавянето на усилвателно стъпало. Схемата на измервателния преобразовател е показана на фигура 3-5.



фигура 3-5 – Измервателен преобразовател на анемометъра

За да се спази условието за отчитане на двуполярен сигнал и като се взима предвид нуждата от използване на еднополярно (акумулаторно/батерийно) захранване, е използвана схема на инструментален усилвател INA827 [103] захранена еднополярно и с повдигане на нулевото ниво в изхода.

За постигане на независимост на резултата от преобразуването от нестабилността на опорното напрежение, аналогично на 2.1.1, напрежението с което се захранва моста е и опорно напрежение на АЦП.

Коефициентът на усилване на усилвателя се подбра така, че при максимален изходен сигнал, в която и да е от посоките на натоварване на товарната клетка, да не се надвишава половината от захранващото напрежение на усилвателя – респективно половината от опорното напрежение на АЦП. В конкретния случай от фигура 3-5 усилването не бива да превишава 500 пъти, като освен това трябва да се имат предвид толерансите на елементите и допустимите претоварвания на сензора (виж 3.2.3).

Поради специфичните характеристики на сензорите (високото изходно съпротивление, дългите линии между входящия блок и сензорите, голямото усилване и т.н.), на входа на инструменталните усилватели са поставени и комплект нискочестотни филтри. Тяхната цел е да отстранят от входящия сигнал възможни нежелани влияния от шумове и хармонични честоти.

Всеки канал е снабден с два еднакви серийни нискочестотни филтъра – по един за всеки от входовете на инструменталните усилватели. Честотата на срез на тези филтри е подбрана на декада по-ниско от минималната честота на дискретизация на АЦП, за да се намали влиянието на шумовете при измерването:

$$(3-12) \quad f_C = \frac{1}{2\pi RC_{CM}} = \frac{1}{2\pi \times 10^3 \times 10^{-6}} = 159 \text{ Hz}$$

Допълнително, за подобряване на общия коефициент на потискане на синфазните сигнали, между входовете на всеки от каналите е включен и по един кондензатор, който заедно с резисторите от серийните филтри образуват диференциален нискочестотен филтър. Честотата на срез на диференциалните филтри се избира на декада по-ниска от тази на серийните филтри, за да се намали влиянието на смущенията генерирани от разликата в толерансите на елементите изграждащи двата серийни филтъра. Това става най-лесно като се използва 10 пъти по-голям кондензатор за диференциалния филтър. Трябва да се има предвид, че тъй като тук се ползват и двата резистора от серийните филтри, то честотата на срез се изчислява с тяхната обща стойност:

$$(3-13) \quad f_c = \frac{1}{2\pi \times 2R \times C_{\text{diff}}} = \frac{1}{2\pi \times 2 \times 10^3 \times 10^{-5}} = 8 \text{ Hz}$$

3.2.3 Статичен параметричен анализ

Функционалността на описаната система зависи от способността ѝ да покрие референтните точностни изисквания към подобни системи. За целта е необходимо да се симулира въздействието на отделните компоненти влияещи върху точността на системата.

Няколко параметъра на описаната до тук анемометрична система определят точностните ѝ характеристики – обхватът на товарните клетки, аеродинамичните характеристики и характеристики на входния преобразователен блок. За изследването на тяхното влияние е необходимо дефиниране на останалите параметри на системата:

- Захранване на системата с 3,7 V;
- Използване на 12 разряден АЦП;
- Номиналният изходен сигнал за тези сензори е $R_O = 1,0 \text{ mV/V}$;
- Аеродинамичните параметри на кожата са съответно $C = 1,2$ и $S = 0,0048 \text{ m}^2$, съгласно съображенията описани по-горе;
- Земно ускорение – $g = 9,81 \text{ m/s}^2$;
- Плътноста на въздуха – $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$;

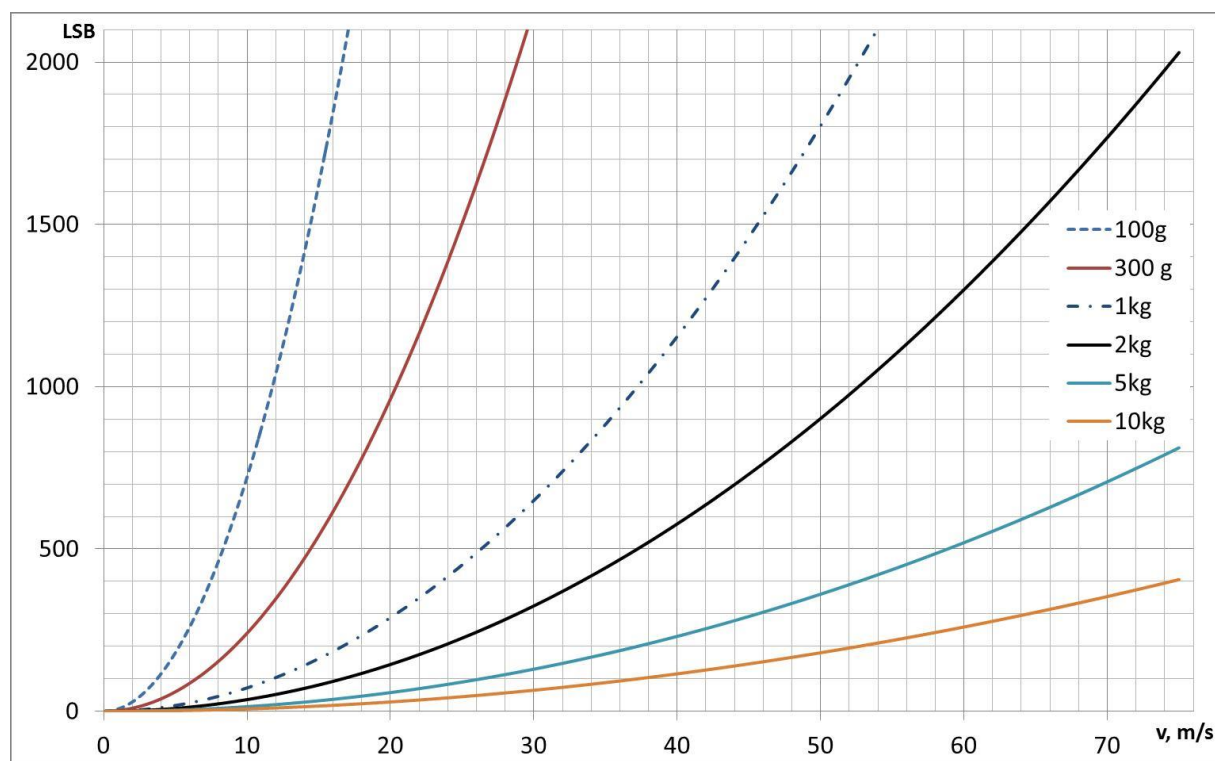
Съгласно описаните по-горе характеристики, максималният изходен сигнал от товарните клетки за всяка от посоките е:

$$(3-14) \quad V_{in} = V_{EXC} \times R_o = 3,7 \text{ mV}$$

Използването на 12 разряден АЦП осигурява общо 4096 стъпки на измерване (LSB) или по 2048 LSB за всяка от измервателните посоки. Следователно минималният входен сигнал, който може да бъде отчетен от АЦП при използването на товарни клетки от 2 kg (19,62N), отговаря на натиск със сила 9,6 mN или 1,84 μV изходен сигнал от товарните клетки.

Еквивалентната скорост на вятъра при така построената система, съгласно уравнение (3-3), е приблизително 1,5 m/s. Трябва обаче да се вземе предвид, че функцията е експоненциална и при скорост на вятъра от около 3 m/s разделителната способност на системата достига 0,5 m/s; а при 7 m/s – тя вече е 0,1 m/s. За максимална скорост на вятъра от 75 m/s разделителната способност достига стойност от 0,02 m/s.

На фигура 3-6 са представени предавателните характеристики на шест товарни клетки с различен обхват.



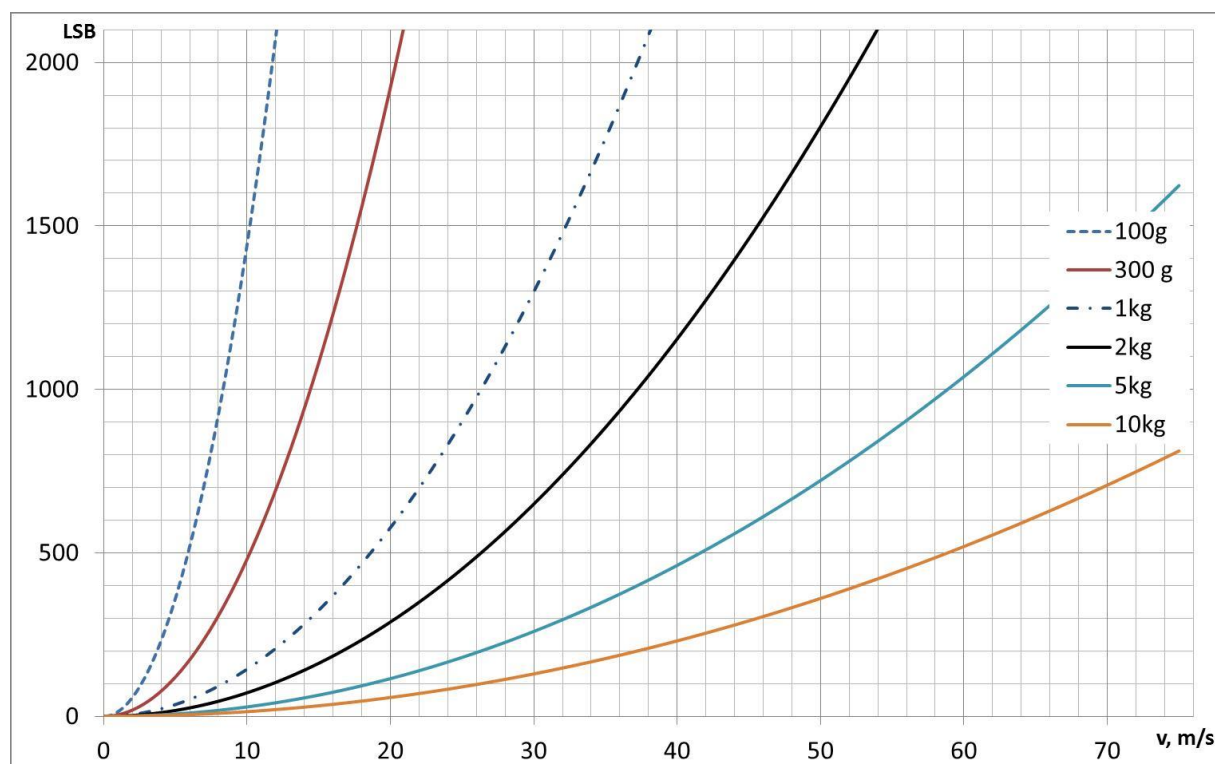
фигура 3-6 – Предавателна характеристика на анемометъра

При анализ на представените характеристики се вижда, че за постигане на разделителна способност от 0,5 m/s в самото начало на измервателната характеристика, е необходимо да се използва товарна клетка с обхват от 300 g (2,943 N). Това обаче означава, че АЦП ще се препълни при скорост на вятъра от приблизително 30 m/s.

Допълнителен фактор, който трябва да се вземе предвид в тези два случая, е стойността на безопасното механично претоварване. За товарната клетка с обхват 300 g, максималното безопасно претоварване от 150% (4,41 N) и при зададените параметри отговаря на скорост на вятъра от около 35,3 m/s.

Алтернативно решение за подобряването на характеристиката в началната зона на измервателния диапазон е чрез използването на по-голям кожух.

На фигура 3-7 са представени предавателните характеристики на същите шест товарни клетки от предходния пример, но с два пъти по-голяма напречна проекция на тялото (S).



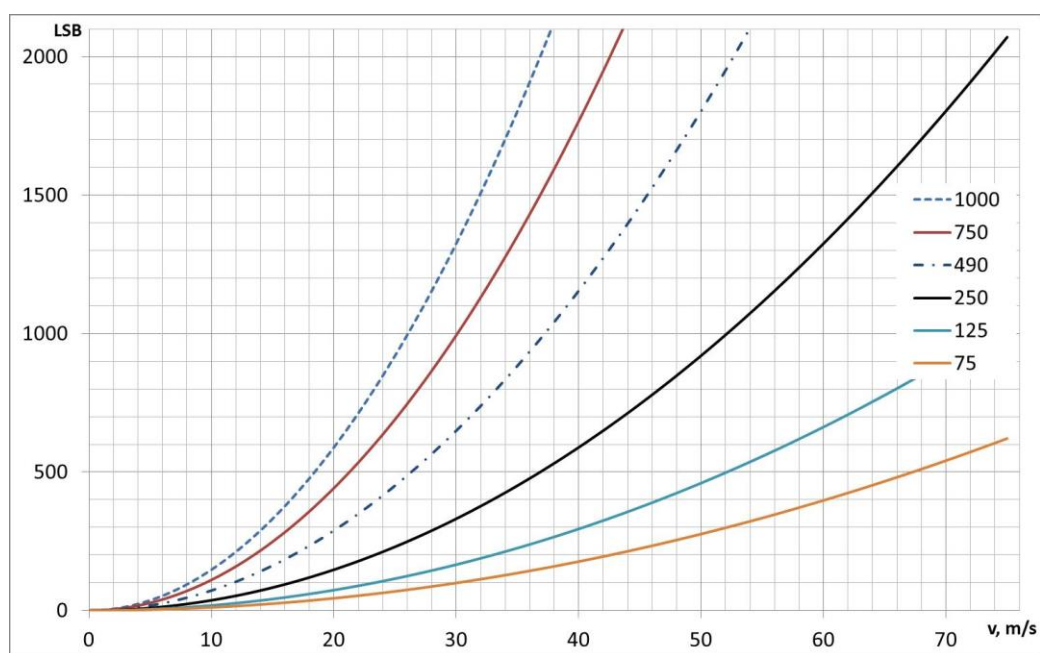
фигура 3-7 – Предавателна характеристика при 2S

Независимо дали ще се избере подход към удължаване на защитния кожух или разширяването му, това ще увеличи площта от напречната проекция на тялото (S) и съответно до прилагането на по-голяма сила върху устройството.

В този случай, използването на еднокилограмови товарни клетки ще осигури разделителна способност от минимум $0,5 \text{ m/s}$ за целия измервателен диапазон, но отново се достига до препълване на АЦП – този път при около 38 m/s . Максималното безопасно претоварване от 150% тук е $14,715\text{N}$, което в случая с удвоеното напречно сечение на кожата отговаря на вятър със скорост под $45,7 \text{ m/s}$.

И в двата случая резултатите показват, че тези методи не са подходящи за измерването на силни ветрове, но пък осигуряват достатъчна прецизност в ниския обхват.

Третата алтернатива за подобряване на характеристиките на системата са параметрите на входния преобразователен блок. Най-лесно това би могло да се постигне чрез повишаване на коефициента на усилване на входният усилвател, без това да повлияе на механичните характеристики на системата.



фигура 3-8 – Предавателна характеристика с програмируемо усилване

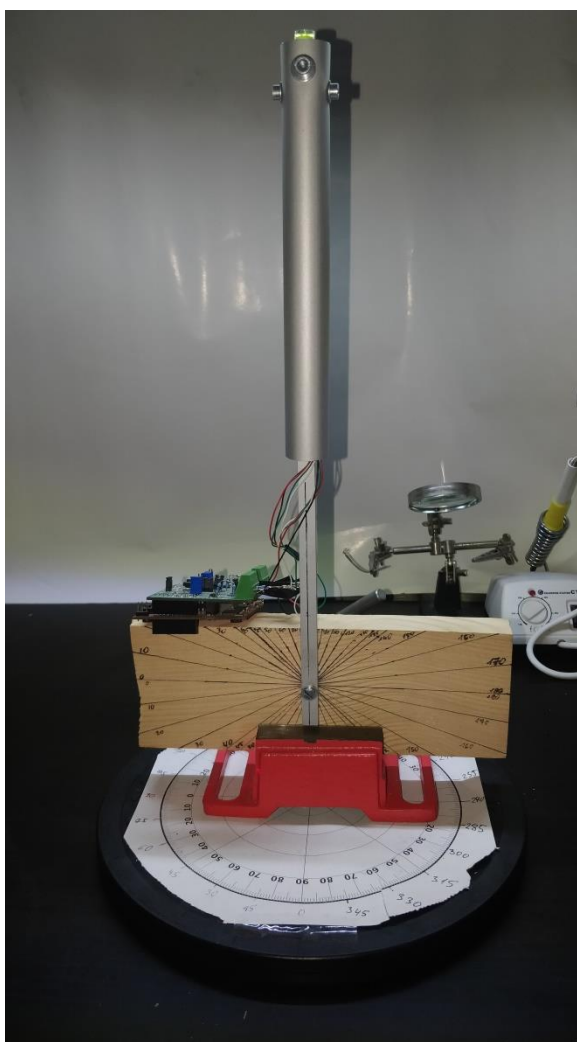
На фигура 3-8 са показани предавателните характеристики на системата при използване на еднокилограмови товарни клетки при различен коефициент на усилване на входния усилвател.

От предавателните характеристики се вижда, че еднокилограмови товарни клетки могат да постигнат разделителна способност от 0,5 m/s при усилване от 1000 пъти. За двукилограмови товарни клетки, същият резултат може да се постигне при използването на коефициент на усилване от 2000 пъти. Този похват обаче би довел и до препълване обхвата на избраното АЦП преди края на измервателния диапазон. Решение за преодоляването на този проблем е използването на програмируем коефициент на усилване – ако усилването бъде намалено 4 пъти за измервания във втората половина на измервателния диапазон, то измервателните характеристики ще се подобрят в първата половина на диапазона и същевременно обхвата на АЦП ще е достатъчен за целия диапазон.

Алтернативно решение на последния проблем е и използването на АЦП с 4 пъти по-голям обхват (14 разряден). И в двата случая е необходимо взимане на допълнителни мерки срещу шумовете и смущенията в сигнала. Комбинирането на двата похвата предлага балансирано решение, но за сметка на усложняване на устройството на системата.

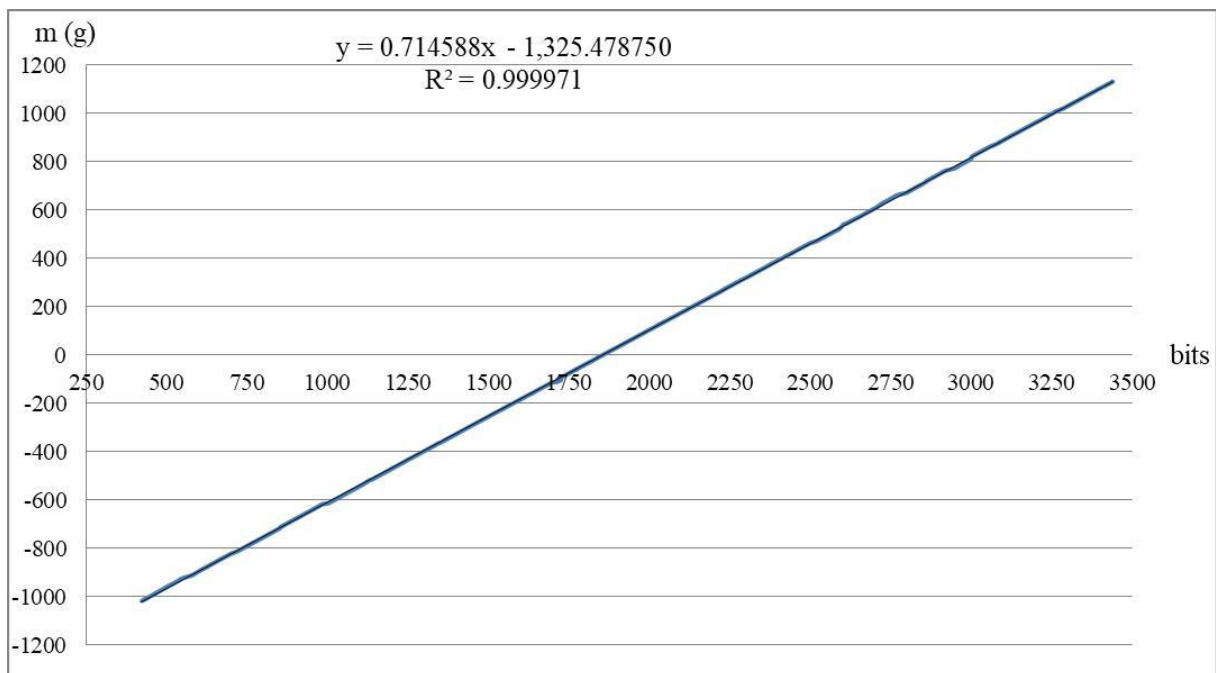
3.3 *Експериментални резултати*

С цел потвърждаване (или отхвърляне) на хипотезата, че проектираният вариант на тензометричен анемометър може да бъде използван за измерване скоростта и посоката на вятъра, бе изградена тестовата постановка с еднокилограмови товарни клетки показана на фигура 3-9, позволяваща обдухването на модела с въздушен поток от различни ъгли.



фигура 3-9 – Прототип и тестова постановка на анемометъра

Предавателната характеристика на така проектираната и разработена система е изследвана експериментално, като сензорите са натоварвани плавно с калибровъчни тежести в серия от близо 500 измервания, при минимална стъпка от 0,5 g. На фигура 3-10 е показан резултатът от проведения експеримент.



фигура 3-10 – Предавателна характеристика на товарните клетки

Получената функция е линейна, даваща връзка между измерената от системата стойност (в битове на АЦП) и приложеното теглово натоварване (в грамове):

$$(3-15) \quad y = 0,714588x - 1325,478750$$

Стойността на въздействащата сила се определя съгласно втория принцип на механиката, при което уравнение (3-15) добива вида:

$$(3-16) \quad F_1 = (0,714588x - 1325,478750) \times g \text{ mN}$$

Коефициентът на детерминация на така получената функция е съответно:

$$(3-17) \quad R^2 = 0,999971$$

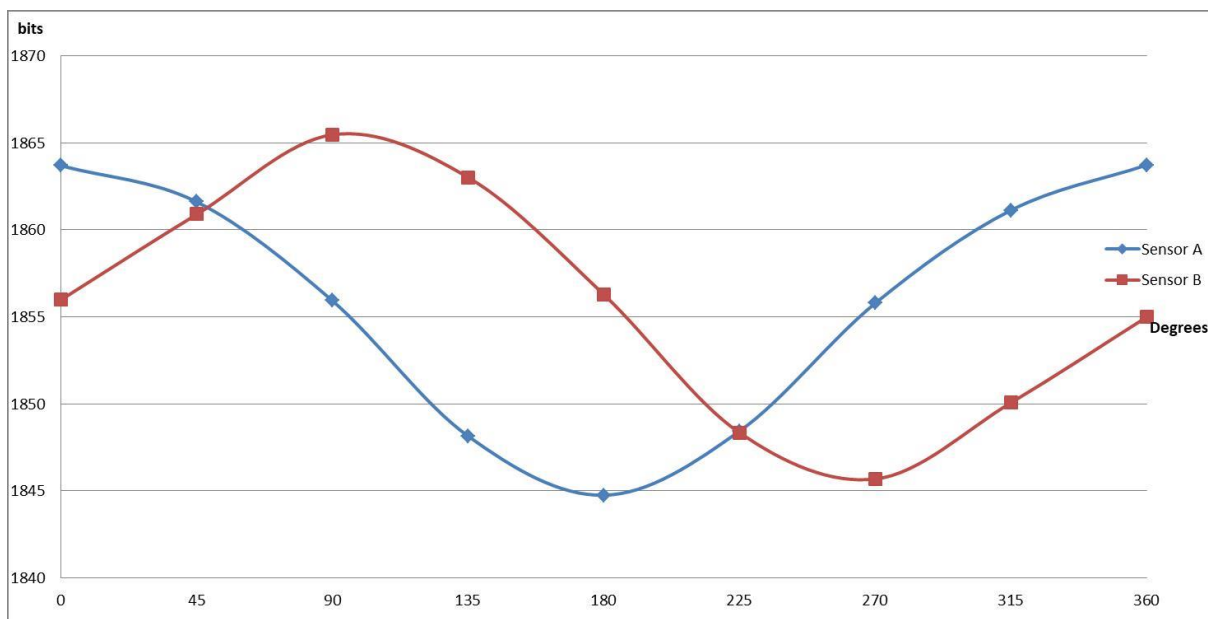
Този резултат предполага използването на изведеното линейно уравнение за целите на по-нататъшните експерименти и тестове на така конструираната система на тензометричен анемометър.

За целите на експеримента, моделът на тензометричния анемометър е закрепен неподвижно в центъра на градуиран стенд, а към него се подава насочен въздушен поток ($\approx 5 \text{ m/s}$). Ъгълът на обдухване на модела се

променя на стъпки, а стойностите на товарните клетки се снемат едновременно. Данните от проведения експеримент са показани на фигура 3-11 и в Таблица 3-1.

Таблица 3-1 – Експериментален резултат на анемометъра

Посока (градуси)	0	45	90	135	180	225	270	315	360
Сензор А – F_x (LSB)	1864	1862	1856	1848	1845	1848	1856	1861	1864
Сензор В – F_y (LSB)	1856	1861	1865	1862	1856	1848	1846	1850	1855



фигура 3-11 – Експериментален резултат на анемометъра

При прилагане на изведената предавателна характеристика от уравнение (3-16) получаваме съответно:

$$(3-18) \quad F_x = (0,714588 \times 1864 - 1325,478750) \times 9,81 = 61,65 \text{ mN}$$

$$F_y = (0,714588 \times 1856 - 1325,478750) \times 9,81 = 7,67 \text{ mN}$$

Съответната сила на въздушния поток, съгласно (3-4) е:

$$(3-19) \quad \vec{F} = \sqrt{\vec{F}_x^2 + \vec{F}_y^2} = 62,13 \text{ mN}$$

Прилагайки уравнение (3-3), за скоростта на вятъра намираме:

$$(3-20) \quad \vec{v} = \sqrt{\frac{2\vec{F}}{C\rho S}} = \sqrt{\frac{2 \times 0,06213}{1,2 \times 1,225 \times 0,2}} = 4,6 \text{ m/s}$$

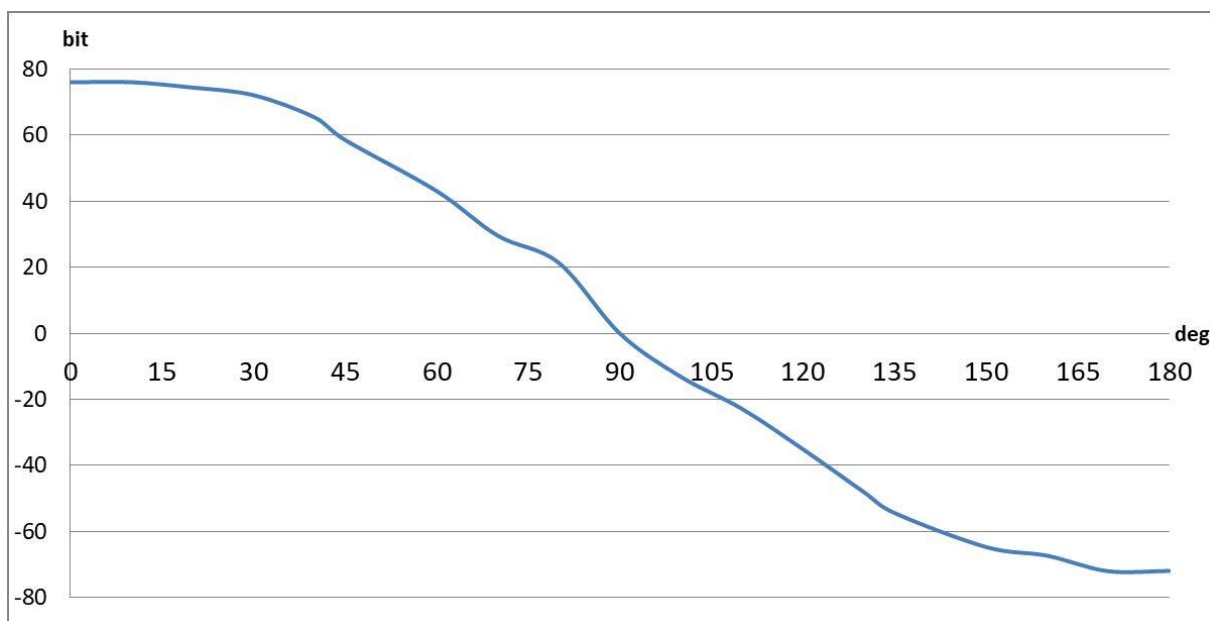
Посоката на вятъра съгласно (3-5) е:

$$(3-21) \quad \theta = \cos^{-1} \left(\frac{F_x}{F} \right) \approx 7^\circ$$

Въпреки, че използваният тестови модел не е много прецизен (източникът на въздушен поток не е много стабилен и не е много силен, и ъглите на насочване не са много точни), полученият резултат има ясно изразена форма на синусоидално изменение на натоварването на двете клетки при промяна на ъгъла на обдухване на анемометъра, а отклоненията от ± 1 LSB са в рамките на грешката на използваното АЦП.

Този резултат потвърждава теоретичната концепция и дава основание за по-нататъшно разработване и усъвършенстване на модела.

С цел опитно установяване на грешката от гравитационното влияние, е извършен експеримент за снемане на зависимостта на сензорите от ъгъла на накланяне на системата по оста на чувствителност на сензора. Сензорът се накланя плавно от 0° до 180° , а резултатът от преобразуването се сема на всяка стъпка, оформяйки графиката на зависимостта. Резултатите от експеримента са показани на фигура 3-12.



фигура 3-12 – Функция на грешката от наклона на оста

Полученият резултат е ясно изразена косинусоидална функция и отговаря на теоретичния модел. Вижда се, че влиянието от този тип грешка може да окаже съществено отклонение в резултата.

3.4 Изводи

В тази глава е предложено оригинално решение за изграждане на система за измерване параметрите на вятъра, подходяща за дълговременна работа в екстремни условия. Предложеното решение е базирано на система от тензометрични сензори измерващи аеродинамичния натиск оказван от вятъра. Построен е прототип на предложената система и е изследвана работоспособността на предложеното решение.

Основното преимущество на предложената система за измерване параметрите на вятъра е, че конструкцията ѝ няма механично движещи се части, а сензорите са добре защитени от влиянието на околната среда – замръзване, блокиране и механично увреждане. Това повишава надеждността на системата при работа в екстремни условия и я прави подходяща за интегриране към системи за дълговременни измервания в среда с повишена концентрация на малки частици, влажност, широк диапазон на температурния градиент и труден достъп – полярни и високопланински условия.

Концепцията дава възможност да се изградят системи с достатъчен диапазон на чувствителност, като това ги прави лесно адаптируеми за специфични условия. Същевременно цената за изграждането им остава относително ниска, тъй като се използват широко разпространени компоненти.

Недостатък на предложената система е силната зависимост на функциите на товарните клетки от наклона на основната ос спрямо основата (гравитационното влияние). На практика при ъгъл на оста различен от 90° , се появява статична грешка в едната или двете товарни

клетки. Изследването на тази зависимост обаче показва че функцията на грешката е косинусоидална и повторяема, което дава възможност за компенсирането ѝ чрез отчитане ъгъла на наклон на оста. Това може да стане чрез добавянето на малък електронен триосов жироскоп, който да отчита ъгъла на основната ос по време на измерване.

Друг общ недостатък на системите за измерване посоката на вятъра, който е валиден и тук, е необходимостта от „осеверяване“ на системата при монтаж. Това може да е доста трудоемка задача, когато системата трябва да бъде монтирана в необслужваеми зони и при екстремни условия. Удобно решение е монтирането на триосов компас към основната ос на системата. По този начин системата може предварително да се ориентира, като данните от компаса и осите на чувствителност на тензосензорите се синхронизират.

Като допълнение към системата може да се добави и триосов акселерометър. Данните от него могат да се използват като помощни данни при отчитане поривите на вятъра и възможни грешки възникнали в следствие на механични вибрации.

3.5 Постигнати по-съществени резултати

1. Предложено е оригинално решение за изграждане на система за измерване параметрите на вятъра при работа в екстремни условия, базирано на тензометрични сензори.
2. Изследвани са теоретичните принципи, влиянието на параметрите на околната среда и е извършен анализ на характеристиките на предложеното решение.
3. Построен е прототип на предложеното решение. Разработена и експериментирана е схема за снемане и регистриране на сигналите от тензометричните сензори на прототипа.
4. Проведени са експерименти за определяне работоспособността на системата. Приведени са експерименталните данни.
5. Предложена е процедура за определяне на скорост на вятъра и посоката му от регистрираните данни от тензометричните канали.
6. Предложени са насоки за отстраняване на недостатъците на анемометричните системи.

4 Адаптивна система за измерване параметрите на околната среда

В глава 4 е представен модел на адаптивна система за измерване параметрите на околната среда.

4.1 Адаптивни системи за метеорологични измервания

Основните фактори, оказващи влияние върху разработването на системата са работните условия при които тя ще функционира, енергийната ѝ обезпеченост, автономността и кооперативността ѝ. Специфично за разработваната система изискване е комбинирането на високо производителния режим за следене параметрите на околната среда в реално време и изискванията за минимална консумация на системите за дълговременни метеорологични измервания (автономен режим).

Дълговременните режими на запис изискват системата да може да прави регулярни отчитания на параметрите, да се привързва достатъчно точно към глобалното време за да може данните да бъдат сравнявани с други измервания и да може да функционира самостоятелно за много дълги периоди от време.

Режима на работа в реално време изисква от системата постигането на значителна производителност – минимални времена на обработка и отговор по заявки, при разширен набор от измервания, както и подходяща комуникация с потребителя.

Съгласно поставените по-горе изисквания, се налага разработването на специфични схемотехнични и програмни решения, позволяващи динамичното адаптиране на системата към режима на работа и условията на средата.

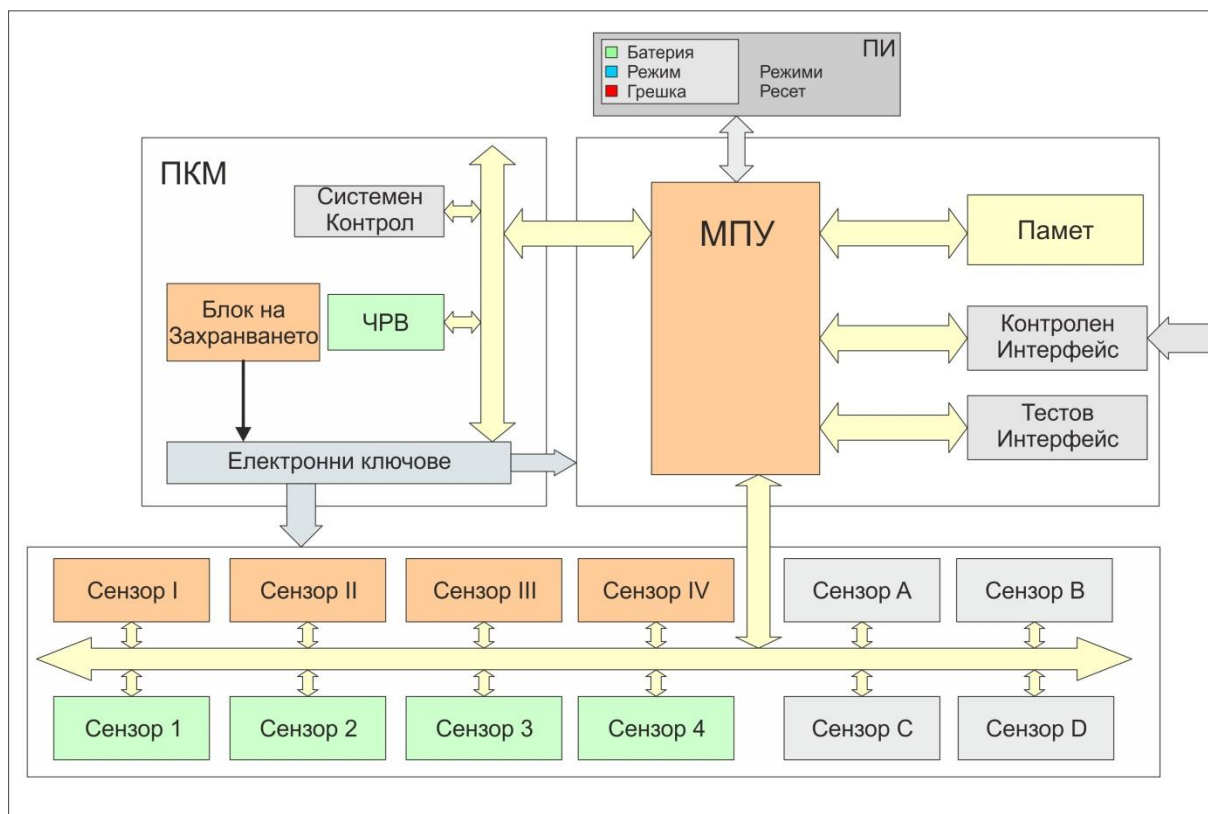
4.2 Хардуерен дизайн

От гледна точка на хардуерния дизайн е необходимо да се разработят няколко основни компонента, които ще придадат на системата възможности за ефективно адаптиране към специфичните особености в работния режим – енергоемкост, изчислителна мощност и измервателни прибори.

За целта системата се разработва на база на три основни подсистеми:

- Подсистема за контрол на мощността
- Управляваща подсистема
- Сензорна подсистема

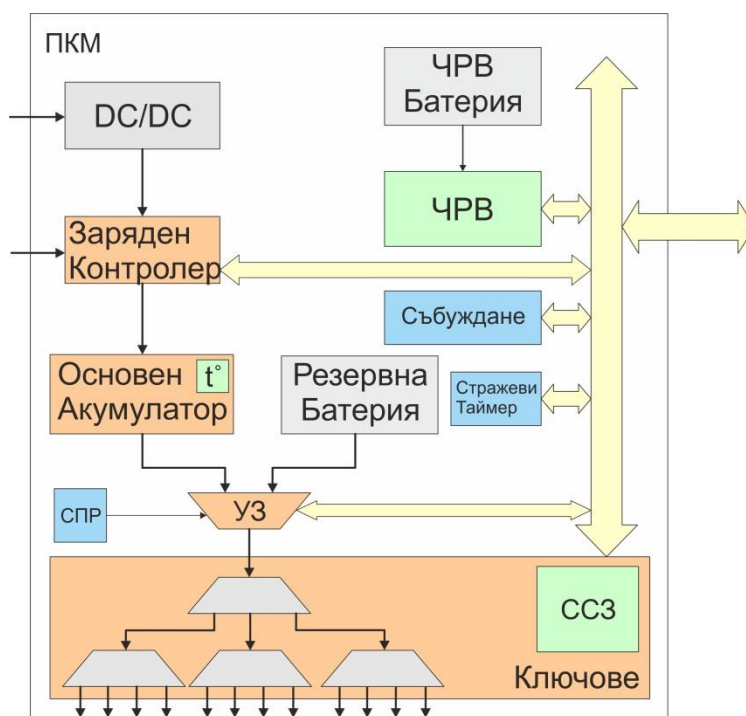
Всяка от тези подсистеми осигурява различни или комбинирани решения на поставените изисквания. На фигура 4-1 е показана обобщена блокова схема на проектираната система, като са представени основните подсистеми и връзките между тях.



фигура 4-1 – Адаптивна система за многопараметрични измервания

4.2.1 Контрол на мощността

Подсистемата за контрол на мощността включва всички схемотехнични решения за подсигуряване и управление на захранването, компонентите за следене и поддържане функционалността на системата. Структурната схема на подсистемата за контрол на мощността е показана на фигура 4-2.



фигура 4-2 – Подсистемата за контрол на мощността

Енергийното обезпечаване на системата е основен приоритет за подсигуряване самостоятелното ѝ функциониране, при много дълги периоди без обслужване. То включва подсигуряване на енергиен резерв в системата, минимизиране на консумацията и възстановяване на енергийните запаси (когато това е възможно).

Подсистемата за контрол на мощността има за задача да свали до минимум консумацията на енергия от системата при работа в автономен режим. Този режим се характеризира с периоди на неактивност, които многократно надвишават времето на измерване. Поради тази причина фокусът при изграждане на подсистемата е намаляването на консумацията именно в периодите на неактивност.

За да се ограничи консумацията на енергия по време на неактивния период на автономния режим, е изградена двустъпална система от електронни ключове. Тази схема позволява включването и изключването на всеки модул в системата, като същевременно ограничава консумацията на енергия в неактивен период до консумацията на един електронен ключ. За да се избегнат възможни утечки през интерфейсите шини, към системата е добавена и схема на интерфейсен мултиплексор/изолатор. Така изградената схема образува отделни региони на захранване, което позволява включването само на определена група модули и дори работата с отделни сензори, като значително се намалява общата консумация на системата. Това придава гъвкавост на системата и позволява на контролните алгоритми да изолират ниско приоритетните модули при недостиг на захранване.

Всеки регион е снабден със схема за следене на захранването. Нейната функция е да държи модулите в региона в състояние на рестарт до установяване на захранването в региона. Това е необходимо за да се избегне неправилно стартиране (glitch) на модулите. Те също така осигуряват на управляващата система и сигнал, когато региона е установен в работен режим. Всеки от ключовете е оборудван със защита от претоварване по ток, която сигнализира на управляващата подсистема за проблема и предпазва системата от енергийни загуби вследствие на повреди.

От друга страна, при работа на системата в режим на реално време, е необходимо да се намали времето за отговор от системата. Времето за отговор на системата се определя от сумарните времена за установяване на системата в работен режим, заявка за данни, получаване и обработка на данните, и предаване на резултата. Тъй като всеки компонент на системата има нужда от първоначално време за установяване в работен режим след рестарт, то изключването на регионите и сензорите при работа в реално време би довело до допълнително времезакъснение наложено от времето за

установяване в работен режим както на сензорите, така и на самите региони преди тях. Поради това, при преминаване на системата в режим на реално време, е необходимо всички региони и модули да бъдат непрекъснато захранени и поставени в активен режим. Този режим предполага максимална консумация, което поставя изискване към контролните алгоритми за стриктно следене както на захранването, така и на активността по външните интерфейси на системата (4.3.2.3).

Подсигуряването на енергиен резерв в системата е на базата на два енергийни източника – основен акумулатор и резервна батерия. Повечето метеорологични станции за дълговременни измервания в необслужваеми зони са снабдени с различни самостоятелни източници на захранване – соларни панели, вятърни или водни турбини. Тези източници обаче са практически неприложими в условията на полярната зима, поради което акумулатора е оразмерен да захранва системата без презареждане около 12 месеца (в зависимост от работните настройки). Резервната батерия позволява на системата да продължи да работи ефективно в автономен режим дори след изтощаването на акумулатора, като може да удължи ефективната работа на системата с още до 4 години. Преминаването от основно към резервно захранване става с помощта на схема за управление на захранването (Voltage Manager) – адаптирана за целта схема за следене на захранващото напрежение, управляваща система от ключове.

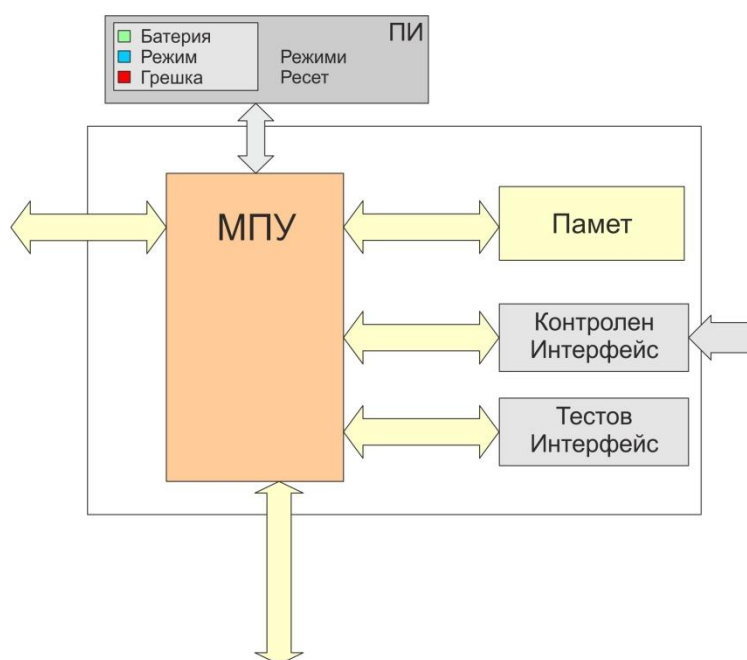
Акумулаторната подсистема е снабдена със схема на заряден контролер. Той осигурява зареждането на акумулатора от външен източник, като това може да бъде както потребителския интерфейс (USB), така и външен източник с напрежение до 36 V. Също така, той подава информация за състоянието на батериите към управляващата подсистема, на база на която последната може да вземе решение за ограничаване на консумацията по време на необслужваемия период на работа. Това може да се постигне чрез изключването на някои нископриоритетни сензори или чрез редуциране честотата на отчетите. Към схемата на зарядния

контролер спадат и предвидените защиты от презареждане, преразреждане, претоварване по ток, прегряване и късо съединение при акумулатора.

Часовникът за реално време и системната стражева схема, макар и дефинирани като управляващи устройства, фактически принадлежат към подсистемата за контрол на мощността, тъй като на тяхна база се изгражда схема гарантираща безотказна работа на станцията. Часовникът за реално време осигурява също така и времевия печат необходим за синхронизация на измерените параметри с глобалните бази данни.

4.2.2 Управление

Управляващата подсистема осигурява хардуера необходим за изпълнението на интелигентните алгоритми организиращи ефективната работа на системата, информационния поток и комуникацията с потребителя. Структурната схема на управляващата подсистемата е показана на фигура 4-3.



фигура 4-3 – Управляваща подсистема

Изградена е на базата на микроконтролер и включва потребителски интерфейс за непосредствена работа със системата, интерфейси за обмен

на информация с други системи, часовник за реално време и памет за съхранение на данните от измерванията.

Управлението на системата е реализирано от вградено програмно осигуряване, включващо алгоритми за определяне режимите на работа на системата, за захранване на сензорите, синхронизация, откриване на грешки, анализ и пренастройване на работните режими, събиране и предаване на данни (4.3).

Станцията разполага с три командни интерфейса – два RS-232 и един USB. Интерфейсите са снабдени със защити от електростатичен разряд и разполагат със собствен регион на захранване, което позволява тяхното ефективно управление при енергоспестяващите режими. Въпреки че всеки един от тях има пълен достъп до всички функции на системата, са организирани в приоритетна йерархия, като с най-висок приоритет е USB интерфейса, следван от първичния RS-232 и накрая вторичния RS-232.

USB интерфейсът е предназначен за директно предаване на данните към компютърни системи с цел следене на параметрите от оператор в реално време. Този интерфейс е по-удобен за директна работа със системата и позволява по-бърз обмен на данните. Наличието му позволява на системата да се свързва и с мобилни устройства. Мобилните устройства (таблети, PDA, смартфони, лаптопи и т.н.) не разполагат със сериен интерфейс, но пък са предпочитани за работа в отдалечени райони поради малките си размери и тегло.

Двата RS-232 са сервизните интерфейси на системата, предназначени за връзка с други автономни системи. Това дава възможност станцията да бъде интегрирана като модул в по-голяма система и активно да обменя данни с нея. Тези интерфейси са подходящи за работа при по-големи разстояния между устройствата – нормално около 15 m срещу 3-5 m при USB; и до 300 m [82] при използване на ниско капацитивни кабели и ограничаване скоростта при трансфера на данни. По-големи разстояния

могат да се постигнат от други стандарти (RS-485 – до 1200 m [98]), но с оглед на специфичните работни условия в отдалечени райони е нерентабилно изграждането на подобни кабелни връзки. Ако въпреки това специфичните условия налагат използването на толкова дълги кабелни връзки, към портовете са предвидени допълнителни изводи за захранване на външни преобразуватели от RS-232 към RS-485 или друг стандарт. Това захранване е изведено на отделна букса, но е предвидена и възможност за поставянето на мост между захранването и извод 9 на конектора DB-9.

Наличието на два серийни интерфейса позволява изграждането на мрежа от станции, събиращи данни от различни отдалечени точки и препредаващи информацията от измерванията към главната система или компютър. Мрежовата конфигурация дава възможност за многоточкови параметрични изследвания на процеси, които не могат да бъдат изследвани с локална (едноточкова) система – разпространението на сеизмични вълни, движение на ледници, движение на локални въздушни фронтове и т.н. Допълнително преимущество на мрежовото свързване е, че някои енергоемки операции (синхронизиране по време, преобразуване на данните и т.н.) могат да се поемат за изпълнение от една енергоосигурена система в мрежата, като по този начин се повишава енергоефективността на другите.

Съхранението на данните е съществена задача от работата на подсистемата за управление. Системата включва две функционални групи вградена памет за данни – памет за съхранение на системните променливи (системна памет) и памет за съхранение на данните от измерванията (памет за данни) . Паметта за данни е организирана в два блока, като с цел подсигуряване срещу системен отказ, всеки от тях е свързан към микроконтролера посредством различни вътрешносистемни интерфейси.

Първият блок е изграден от три еднакви модула флаш памет. Той осигурява основният работен обем за съхранение на данните. Получените

данни от измерванията се записват последователно в модулите памет, като адреса на записа се увеличава след въвеждане на данни и в трите модула. Тази методика осигурява допълнителна защита на събраните данни в случай на повреда в някой от модулите на паметта, като същевременно всеки един от модулите съдържа данни от целия период на измерването.

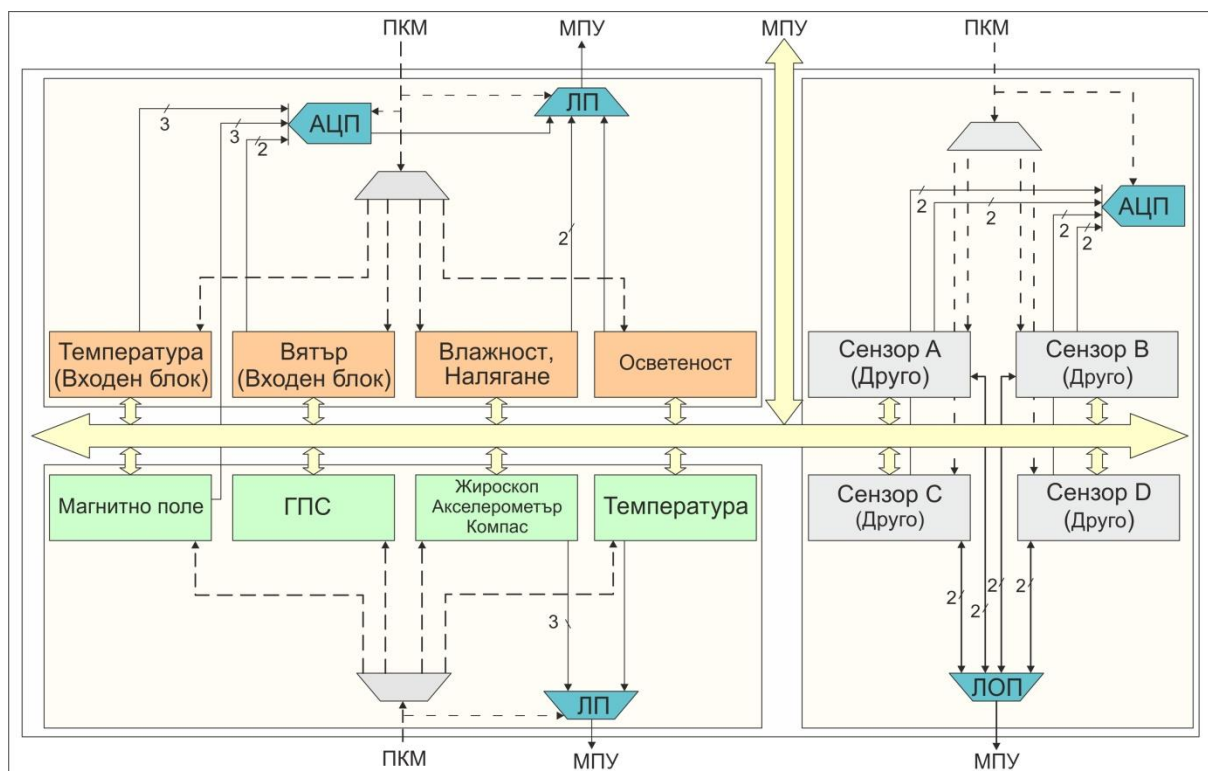
Вторият блок съдържа по-малка по обем EEPROM памет, която служи като резервен буфер за данни. При свързване в мрежа, този блок се използва като временен буфер за съхраняване на данните получени от други системи в мрежата. В режимите на дълговременен запис, в случай на отказ или препълване на основната памет, този блок се използва за съхранение на данни и системни грешки. Това позволява на системата да остане ефективна, макар и при силно редуциран интензитет на натрупване на данните. Запазването на данните непосредствено преди и след появата на отказ е от голямо значение за последващ анализа на възникналото събитие.

Системата разполага с вграден потребителски интерфейс, който позволява ръчно управление с ограничен набор операции. Интерфейсът включва бутони и четири светодиода за обща индикация. Вградените бутони са три - за рестартиране на системата, извеждането/въвеждането ѝ от/в автономен режим и промяна интензивността на записите – бърз или бавен режим. Четирите светодиода са за индикация на състоянието на системата – възникване на грешка, работа с паметта, режим на готовност (stand-by) и състояние на батерията. Този блок е включен към интерфейсния регион на захранване и се управлява активно от алгоритмите за ограничаване на енергоразхода.

Към системата е предвиден и интерфейс за тестване и препрограмиране на микроконтролера, позволяващ оптимизиране и коригиране на програмния код.

4.2.3 Сензори

Сензорната подсистема включва всички необходими компоненти за подпомагане и извършване на преобразуване, нормализиране и обработката на въздействията от околната среда.



фигура 4-4 – Сензорна подсистема

Сензорите са разделени на 3 блока. Всеки блок е снабден с четири самостоятелни региона на захранване, което позволява динамичното управление на мощността според нуждите на системата.

Първият блок е предвиден да поддържа компонентите за измерване на основните параметри на околната среда – температура, налягане, влажност, осветеност, скорост и посока на вятъра. Този блок е подсигурен със собствен АЦП и линия за прекъсвания към микроконтролера.

Предвидени са три канала за температурни измервания с платинени терморезистори свързани по трипроводната схема разгледана в 2.1.1. Това позволява на системата да прави прецизни измервания в три точки – температура на въздуха, повърхностна температура и температура на

почвата. Тъй като тези схеми са относително енергоемки, те са обособени в собствен регион на захранване. Това позволява както минимизиране на консумацията от акумулатора, така и по-добър контрол на грешката от самонагриване. Аналогично, вторият регион е запазен за системата за измерване на скорост и посока на вятъра, изградена посредством тензометричния анемометър представен в 3.2.

Третият регион е резервиран за сензорите за относителна влажност и атмосферно налягане. Тъй като сензорът за влажност на въздуха включва и вграден полупроводников температурен сензор, то тази група сензори съставлява най-основната и същевременно най-енергоефективната измервателна група. Това прави този регион подходящ за обособяването на резервна измервателна група, която да поддържа ефективната работа на системата дори при силно намален енергиен ресурс.

Четвъртият регион е предвиден за захранване на сензорите за осветеност. Целта е да се включат серия от сензори осигуряващи максимално много данни за спектъра, интензитета и мощността на светлината. Тези сензори са с относително ниска консумация, а измерените от тях данни могат да представляват значителен интерес за различни изследвания. Поради това те са обособени в отделен регион, което позволява да им се даде приоритет пред по-енергоемки измервания.

Вторият блок включва контролни и помощни сензори. Целта на тази група сензори е да подпомагат и контролират измервателните функции на системата. Тя включва акселерометър, компас, жirosкоп, сензори за магнитно поле, GPS и термометър.

Сензорите за ориентация на системата в пространството - акселерометър, компас и жirosкоп, са обособени в собствен регион на захранване. Предвидено е те да могат да бъдат изнесени от системата, за да могат да служат като помощни сензори за монтажа на анемометъра (виж 3.4); или като референтни данни за случайни промени в ориентацията на

системата, които биха могли да окажат влияние върху измерванията – например завъртане на сензорите за осветеност.

Системата за глобално сателитно позициониране е предвидена като средство за синхронизиране на системата по време. Тя може да бъде използвана и като средство за локализиране на модул от системата свързан в мрежата, особено необходимо за случаите когато измерването се прави върху подвижен район – ледник или свлачищен район. Тъй като процеса по глобалното сателитно позициониране е изключително енергоемък, модула разполага със собствен регион на захранване.

Сензорите за магнитно поле са предвидени като средство за засичане на силни електромагнитни смущения, които биха могли да повлияят на измерванията. Те също са отделени в собствен регион на захранване.

Към този блок е предвиден и полупроводников температурен сензор. Той е монтиран в близост до входните преобразуватели и може да бъде използван като източник на референтни данни за температурна компенсация на входните преобразуватели. Той се използва от системата и като контролен сензор, алармиращ за твърде високи или твърде ниски работни температури на системата.

Третият блок включва разширителни интерфейси за добавяне на допълнителни сензорни модули със специфично предназначение. Блокът включва собствен 8 канален АЦП, 4 региона на захранване, линия за прекъсвания към управляващия микроконтролер, цифров интерфейс за предаване на данни и 8 линии с общо предназначение.

Ресурсите в този блок са динамично конфигурируеми от страна на управляващите алгоритми (виж 4.3.2.1) и допускат приоритизиране на регионите и вариации в конфигурациите на добавените модули.

В случаите когато се налага добавяне на повече сензори от допустимите за системата, може да се изгради мрежа от няколко близко разположени устройства с различен набор от специфични сензори.

4.3 Софтуерното обезпечаване на системата

Софтуерното обезпечаване на системата е организирано на две нива – вградено програмно осигуряване и компютърно приложение за работа със системата (потребителски интерфейс). Вграденото програмно осигуряване включва алгоритмите необходими за управлението на системата (изпълнителни алгоритми) и набор от специализирани алгоритми за подобряване ефективността и надеждността на системата (адаптивни алгоритми).

4.3.1 Адаптивни алгоритми

Благодарение на значителното повишаване на възможностите на съвременните микроконтролери, като същевременно тяхната консумация непрекъснато намалява, става възможно някои от методите за изграждането на експертни системи да се разглеждат като възможности за подобряване характеристиките на многопараметричните измервателни системи.

Опростяването на тази концепция дава възможност за обезпечаване на ефективността и надеждността на системите за регистриране на параметри на околната среда в необслужваеми зони и при екстремни условия. Особен интерес в случая представлява идентифицирането и обработката на случайни събития. Когато тези събития са вътрешни за системата (грешки, откази и т.н.), тяхното навременно разпознаване и отстраняване би могло значително да повиши надеждността на системата. А ако системата е способна да разпознае и подходящо да регистрира интересно за изследването явление, това значително ще подобри нейната ефективност.

Така пред алгоритмите на адаптивните системи за регистриране на параметри на околната среда се поставят няколко основни задачи:

- Да могат да се самодиагностицират и вземат мерки за отстраняване на възникналите грешки и откази.
- Да могат лесно да се адаптират за работа при специфични условия.

- Да могат самостоятелно да се пренастройват за работа в желания режим и да управляват станцията ефективно според поставените цели и задачи.

За решенията на така поставените задачи е удачно да се използва модулен подход, като се изградят няколко сравнително автономни програмни поведения, които се задействат в зависимост от нуждите на системата.

4.3.1.1 Самодиагностика и управление на грешките

Алгоритъмът за самодиагностика и управление на грешките е базиран на причинно-следствен модел на системно управление. Основната задача е да се отстранят последователно всички появили се грешки, като системата възстанови нормалното си поведение или се установи в режим максимално близко до него.

В системата могат да се появят няколко вида грешки:

- Неизправности в захранващата система – късо съединение, пренапрежение или недостатъчно напрежение на входа на зарядния контролер, твърде висока или ниска работна температура на акумулаторите и т.н.
- Неизправност в периферни устройства – периферните устройства не отговарят, връщат отговор извън нормите или проявяват аномално поведение.
- Недостиг на системни ресурси – ниско ниво на заряда в акумулаторите или недостатъчен обем памет.
- Потребителски грешки – синтактични грешки, невалидни команди, невалидни параметри и т.н.

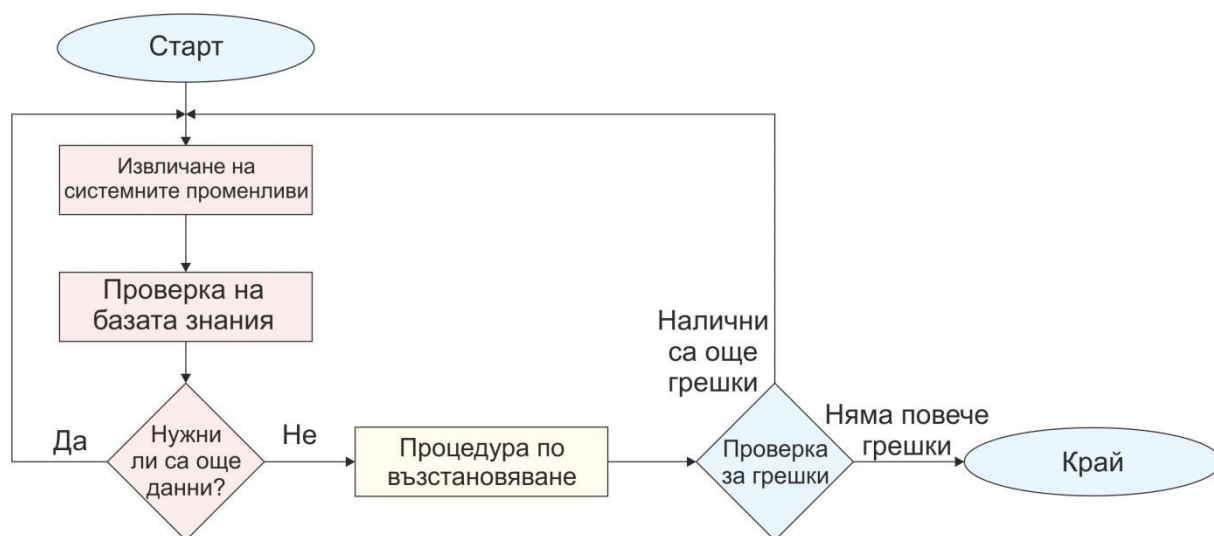
Тъй като е възможно да се появят няколко различни грешки в един и същ момент, на алгоритъма се задават приоритети за обработка на

постъпилите грешки, като той се изпълнява последователно до отстраняване на всички грешки.

С най-висок приоритет се обработват грешките от неизправности в захранващата система, а следващите в йерархията са неизправностите в периферните устройства. Грешките от недостиг на системните ресурси не се считат за критични. Те обаче са необходими за коректната работата на другите алгоритми, поради което се обработват преди потребителските грешки.

Потребителските грешки се обработват с най-нисък приоритет, тъй като са свързани с работата на оператора, а комуникацията с него е относително бавен процес.

Опростената блокова схема на алгоритъма за самодиагностика и управление на грешките е показан на фигура 4-5.



фигура 4-5 – Диагностика и управление на грешките

Едновременните откази в няколко различни компоненти много рядко са причинени от различни и независими събития. По-вероятно е те да са следствие от общ процес, който е повлиял върху няколко подсистеми. Тази концепция предоставя възможност за изграждане на модели от причинно–следствени връзки, чрез които по-лесно да се диагностицира проблема и да се намери решение. Правилната идентификация на процеса дава

възможност да се отстранят множество неизправности посредством едно единствено решение, което прави подхода изключително ефективен.

Така например, поява на отказ в няколко периферни устройства и индикация за включване на защита от късо съединение в един от регионите на захранването подсказва, че най-вероятната причина за всички откази е именно късото съединение. Респективно, заради приоритета на грешката генерирана от късото съединение, тя ще бъде обработена първа, а това от своя страна води до най-големи шансове всички откази да бъдат отстранени. След нейната обработка, алгоритъмът извършва повторна проверка за грешки. В случай че такива все още са налични, процедурата се повтаря до пълното им отстраняване.

Процесът на диагностика стартира със събиране на информация за състоянието на системата – списък на грешките, режим на работа, работни условия (температура, електромагнитна активност, вибрации) и т.н. Тъй като самият процес на събиране и обработка на системните променливи също е енергоемък процес, за да се намали допълнително консумацията от тези операции, системните променливи също са разделени на две групи – първични и вторични. Така първоначалното сканиране на системните променливи събира и обработва само първичните променливи, които са необходими за диагностицирането на мнозинството от случаите, а вторичните се събират и обработват само ако диагностичният модел го изисква. Такъв пример е ако грешката възниква в автономен режим, то тя най-вероятно е от системен характер и няма смисъл да се проверяват потребителските грешки и да се прави анализ на последните подадени команди за изпълнение.

Самата обработка на системните променливи представлява проверка в референтна таблица, която дава съответствия между различните комбинации от грешки и процедурите за възстановяване от тях. Специфичното за тази таблица е, че тя може да бъде попълвана динамично

по време на работата на системата, като се създава нова процедура с последователности от действия на системата при избрана комбинация от системни променливи. Примерен модел на такава таблица е Таблица 4-1.

Таблица 4-1 – Примерна референтна таблица

	П1	П2	П3	П4	...
Автономен режим на работа	X	X	X		
Сервизен Режим				X	
Наличие на оператор				X	
Работни температури извън нормата		X			
Високо ниво на електромагнитни смущения					
Вибрационен профил извън нормата	X				
Индикация за множествен периферен отказ	X	X			
Флаг за периодична проверка					
...					
Вторични параметри					
Индикация за отказ в различни региони на захранване					
команда за добавяне/премахване на сензор				X	
Вид на обработваната грешката					
Пренапрежение					
Недостатъчно напрежение на входа					
Висока температура на акумулаторите					
Ниска работна температура на акумулаторите					
Късо съединение в Регион 1	X				
...					
Късо съединение в Регион n					
Периферно устройство 1.1 не отговаря					
Периферно устройство 1.1 връщат отговор извън нормите					
Периферно устройство 1.1 проявяват аномално поведение		X			
...					
Периферно устройство n.j не отговаря				X	
Периферно устройство n.j връщат отговор извън нормите					
Периферно устройство n.j проявяват аномално поведение					
Ниско ниво на заряда в акумулаторите					
Недостатъчен обем памет			X		
Синтактични грешки					
Невалидни команди					
Невалиден/зает адрес					
Невалидни параметри					

Процедури по отстраняване на грешките се състоят в няколко на брой типични операции – рестартиране на модул, рестартиране на системата,

изключване/включване на сензор към реда за сканиране, изключване/включване на захранващ регион, добавяне на индикация за събитие, съобщения до потребителя и т.н.

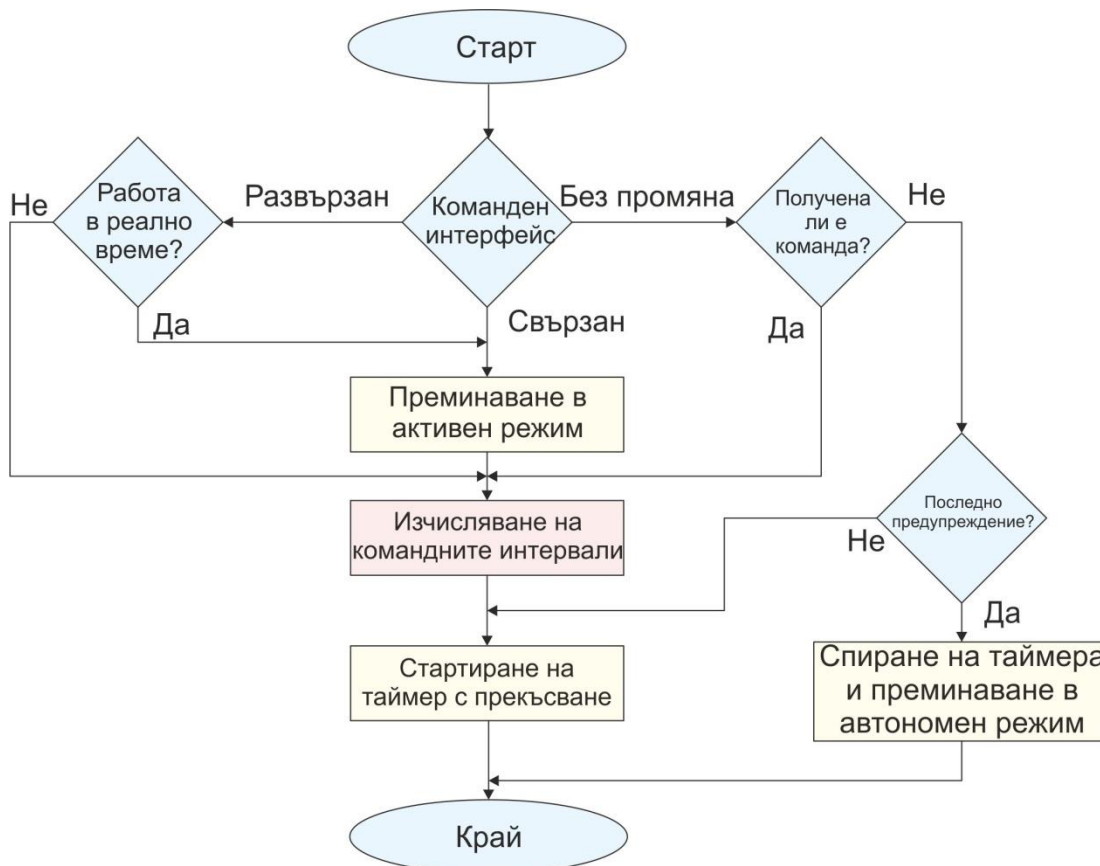
Разглеждайки Таблица 4-1, за случай в който се появи аномално поведение в един или няколко сензора по време на автономния режим и при налично сведение за работни температури извън допустимите, логичното заключение е, че неправилната работа на сензорите се дължи на работните условия. Респективно, тъй като системата не разполага с възможност да премахне първоизточника на проблема, то ограничаването на грешката става чрез изпълнение на процедура (П2) по изключване на всички сензори, чиито параметри не отговарят на работните условия, от реда за сканиране. Като финална операция се активира флаг за периодична проверка, който да провокира периодичен тест на системата за независимо отпадане на грешката (например при възстановяване на работните температури) и евентуално да възстанови пълната функционалност на системата.

Всяка отчетена грешка и последвалото я събитие се записват под формата на код в паметта за данни, чрез който може да се проследи поведението на системата.

4.3.1.2 Потребителски супервайзор

Алгоритъмът за следене на потребителската активност (потребителски супервайзор) е базиран на рефлексен модел на системно управление, чиято цел е да установи наличието на оператор. Ефективното определяне на наличието на оператор е от ключово значение за коректното опериране на системата – от него зависи дали системата ще продължи да работи в подчинен режим или ще поеме пълното управление и ще премине в автономен режим. Този алгоритъм е и източника на информация за наличие на оператор необходим на алгоритъма за самодиагностика и управление на грешките.

За целта, той следи информацията от „сензорите“ за потребителска активност – наличие на свързване с команден интерфейс и честота на подаване на командите. Опростеният модел на блоковия алгоритъм е показан на фигура 4-6.



фигура 4-6 – Блоков алгоритъм на потребителския супервайзор

Свързването и развързването на командния интерфейс провокира автоматична промяна на режима на работа на системата. При свързване на командния интерфейс към системата, алгоритъмът привежда системата в Активен режим и започва проследяване на броя и честотата на командите. Развързването на интерфейса по време на работа на системата в режим на реално време води до незабавното привеждане на системата в Активен режим и се сигнализира на оператора посредством вградената индикация за настъпилия проблем. Ако системата е в Активен режим по време на развързването на интерфейса, то алгоритъмът продължава директно с изпълнението на блока за изчисление на командните интервали.

Блокът за изчисление на командните интервали представлява специфичният рационален модел на управление на системата. Неговата функция е да намали енергоразхода на системата, като я превключи в по-ефективен режим при отсъствие на оператора, като същевременно предотврати ненужните превключвания на системните режими за случаите на неволно развързване на интерфейса по време на работния процес (например неволно издърпване на кабела на контролния интерфейс).

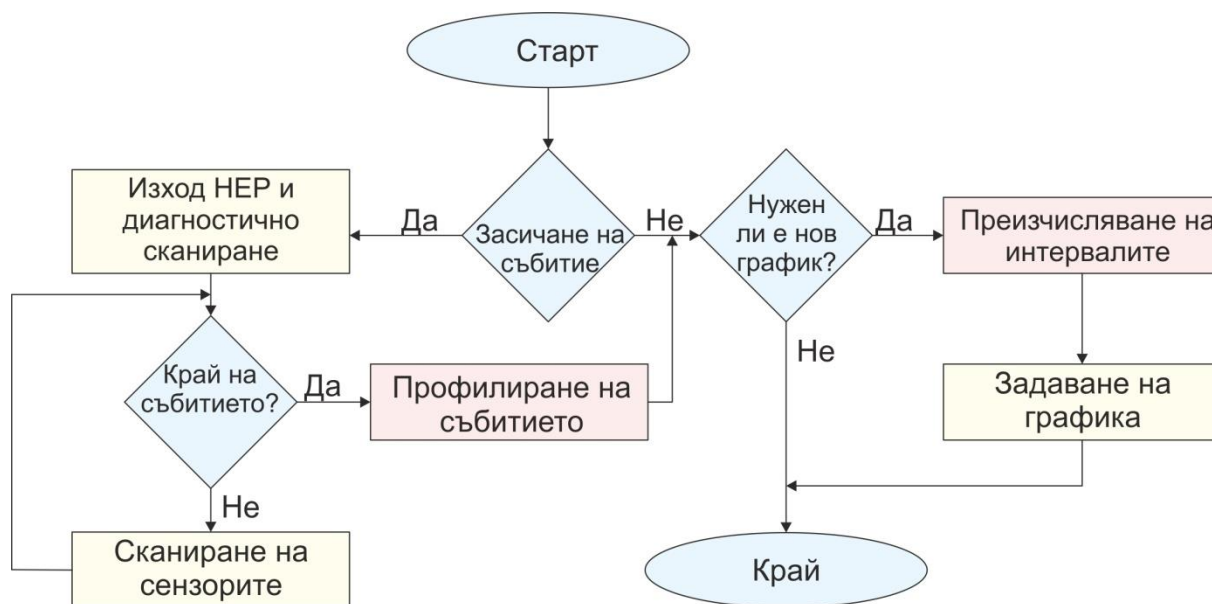
Алгоритъмът определя средния интервал между последните 10 валидни подадени команди и на тази база предвижда кога трябва да се появи следващата команда. Ако такава не постъпи в рамките на три пъти по-голямо време, системата подава предупреждение към потребителя посредством вградената индикация. Ако команда не постъпи и след още 3 интервала, системата подава последно предупреждение и изчаква още 15 секунди, след което стартира процедура по привеждането на системата в Автономен Режим.

4.3.1.3 Адаптивен контрол

Адаптивният контрол е алгоритъм за управление темпа на натрупване на данни при Автономния режим. Целта на алгоритъма е да запази ефективността на системата за колкото е възможно по-дълъг период, като същевременно тя остава в състояние да регистрира отделни непредвидени събития.

Тази концепция изисква от алгоритъма да може сам да определя темпа на натрупване на данните и да е в състояние динамично да го променя в зависимост от външни фактори. За целта алгоритъмът използва информацията за наличните системни ресурси (максимален заряд на батериите и акумулаторите и наличния обем на паметта за данни) и зададената от оператора очаквана дата на следващо обслужване. Създава се първоначален график за отчитане на данните от сензорите, като се предвижда и буфер от системни ресурси за регистриране на непредвидени

събития. Интензивността на отчитане на данните съгласно така изчисления график се сравнява със зададената от оператора честота на отчитане, като за действителните интервали на измерване се взима по-малката от двете. На фигура 4-7 е показана опростената блокова схема на алгоритъма за адаптивен контрол.



фигура 4-7 – Блоков алгоритъм на Адаптивният контрол

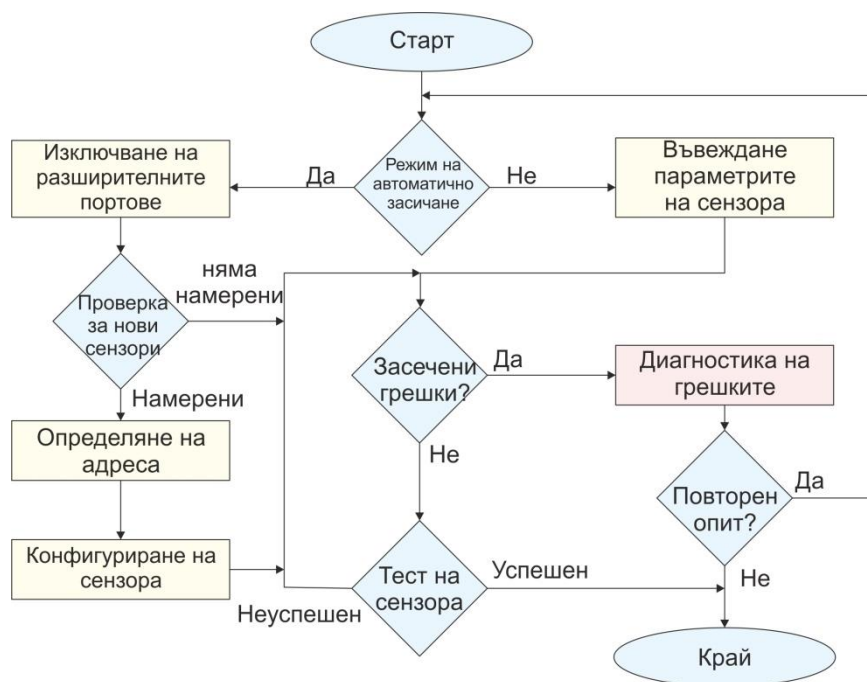
Интервалът за сканиране на сензорите се преизчислява периодично, като се прави анализ на динамиката на измерваните величини – по-голямата скорост на промяна на измерваните параметри между отчетите провокира скъсяване на интервалите на отчитане, а по-малките промени водят до удължаване на интервалите между отчетите. Минималният интензитет на отчетите се ограничава от изискването на световната метеорологична организация за трикратно отчитане на параметрите в денонощието, а максималният – от горното правило за запазване функционалността на системата до минимум очакваната дата на следващо обслужване. В случай, че очакваната дата на следващо обслужване е вече минала, максималният интервал се ограничава до 10 минути. Това поведение на системата ѝ позволява по-ефективно използване на ресурсите, като същевременно ѝ дава възможност да регистрира ефективно динамиката на измененията в параметрите.

В алгоритъма за адаптивен контрол е предвидена и възможност да се регистрират необичайни събития. При детектиране на необичайни нива от сензорите, алгоритъмът стартира серия от последователни сканирания на сензорите. След приключване на сканиранията данните се обработват от блок за профилиране на събитието, като в зависимост от резултата графика за регулярно сканиране може да бъде променен, така че да се улесни прихващането на вторични събития.

4.3.1.4 Обучение за работа с нови инструменти

Особено важен компонент на адаптивните системи е възможността те да могат лесно да се пригаждат за работа при различни условия и с различно предназначение. От гледна точка на системите за измерване параметрите на околната среда, това изискване включва възможността за включване на допълнителен набор от сензори за измерване на специфични параметри.

За да се улесни добавянето на нови сензори към разширителните портове на системата е предвиден специален алгоритъм, включен към сервизния режим. Неговата структура е представена на фигура 4-8.



фигура 4-8 – Функция за добавяне на нови сензори

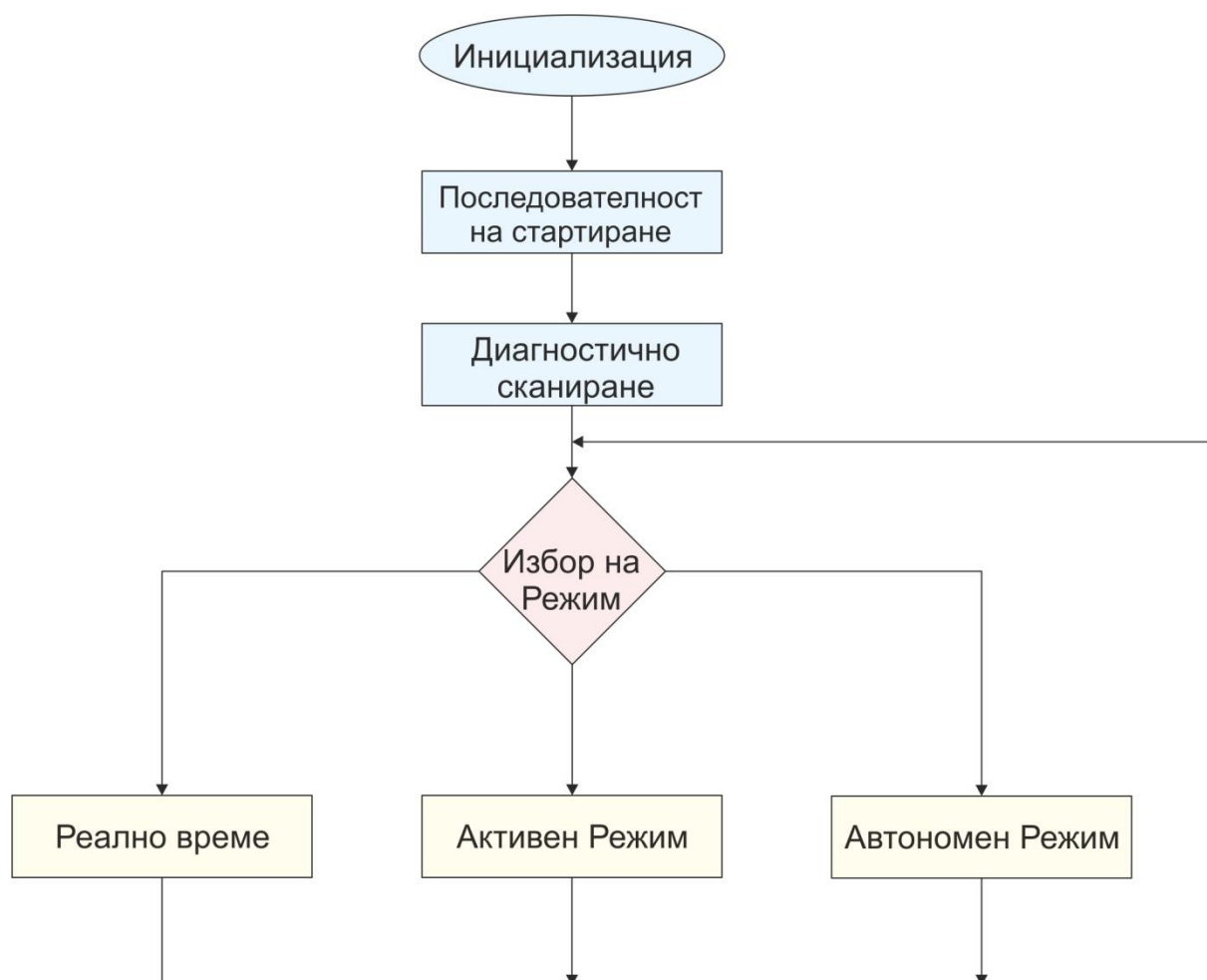
Алгоритъмът поддържа две функции за добавяне на нови сензори – ръчен и автоматичен.

Автоматичната функция е предназначена за добавяне на специализирани сензори, чиято комуникация се организира от собствен микроконтролер поддържащ автоматичния режим на добавяне. Това позволява на системата сама да настрои относително сложният протокол за комуникация между двете системи, като определи свободен адрес, броя и типът на данните предавани при измерване, приоритетите, времето за отговор от системата и т.н.

Ръчната функция позволява добавянето на по-прости сензори, с фиксирани адреси и малък на брой параметри известни от спецификацията на сензора. Въвеждането на всички параметри става посредством интерактивен диалог с потребителя, като междувременно системата извършва проверка за различни видове потребителски и системни грешки.

4.3.2 Изпълнителни алгоритми

Програмният код изпълняван от управляващия микроконтролер включва алгоритмите необходими за ефективното управление на системата, включително интегрирането на набор от адаптивни алгоритми изградени по моделите описани в 4.3.1 – за управление на хранването, работните режими, паметта и самодиагностиката. На фигура 4-9 е илюстрирана обобщената блокова схема на главната програма и условното структуриране на изпълнимите алгоритми в работни режими.



фигура 4-9 – Обща Блокова схема

Вграденото програмно осигуряване на системата включва три основни режима на работа – Активен, Автономен и режим на работа в Реално време. С цел да се оптимизира размера на програмния код, системните алгоритми са изградени като универсални функции, които се конфигурират при извикването им в зависимост от специфичните нужди

на режима. Системните променливи се съхраняват в специално интегрираната за целта системна памет (виж 4.2.2), което позволява техните стойности да се запазят и възстановят при рестартиране на системата.

Инициализацията на системата включва първоначалното установяване на микроконтролера в работен режим, като се извършва и самодиагностика на системите работещи в основния регион на захранване.

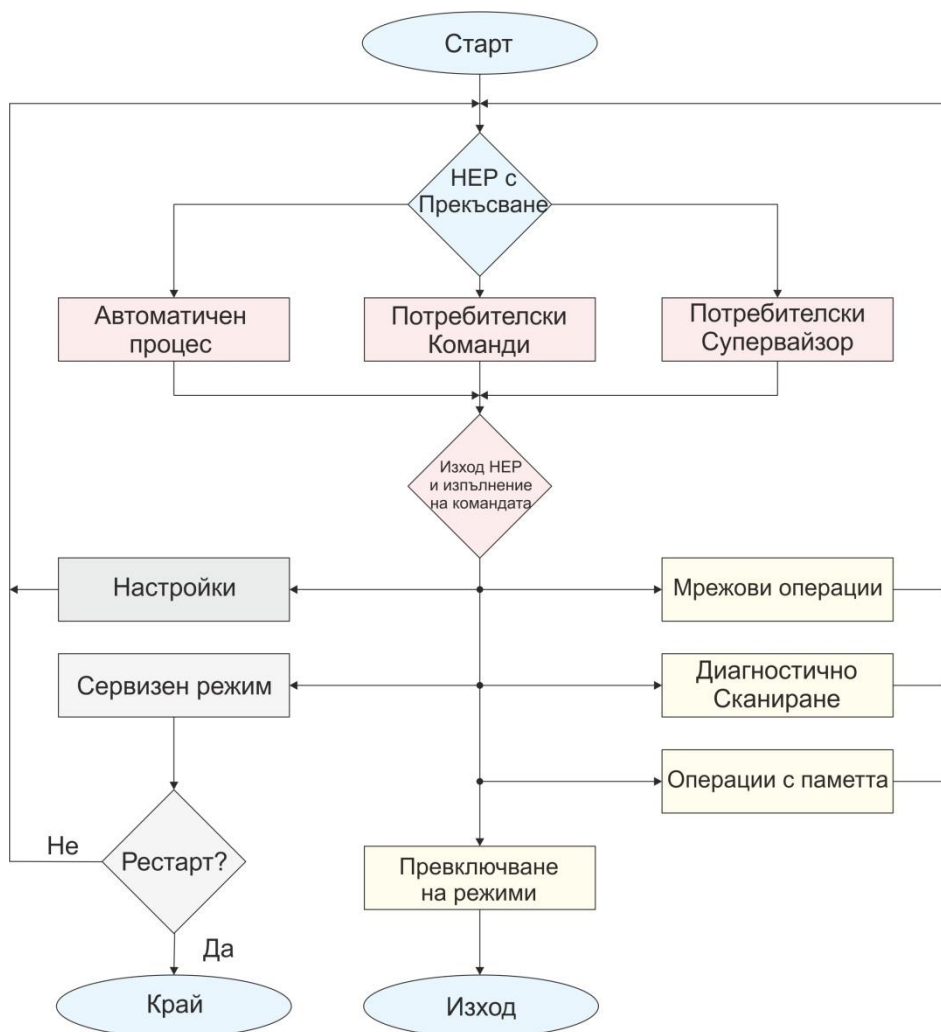
След стартиране на микроконтролерния блок се преминава към следващия алгоритъм – поетапното стартиране на всички региони на захранване. При стартирането на всеки регион се изчаква потвърждение за успешно захранване на региона. В случай на неправилно стартиране или поява на грешка (например индикация за късо съединение), региона се рестартира или съответно изолира от работата на системата.

След успешното запускане на регионите на захранване се преминава към следващия етап от стартирането на системата – диагностично сканиране на сензорите и компонентите на системата. Този алгоритъм сменя последователно данните от сензорите, като извършва и цялостна диагностика на системата – проверява се функционалността на всеки сензор, нивата на захранването, работните температури и т.н. В зависимост от резултата системата стартира цялостно, частично или се поставя в безопасен режим. Прави се контролен запис в паметта с данните от сензорите и запис на грешките и ако е налично свързване с потребителски интерфейс – записът се изпраща на потребителя.

След като системата е успешно подготвена за работа, програмата продължава с изпълнението на желания работен режим. Режимът, който е избран по подразбиране е Активният режим.

4.3.2.1 Активен режим на работа

Активният режим е предназначен за нормална работа на потребителя със системата. Той предоставя пълен достъп до функциите на системата, включително до сервизния режим, командите за настройка, сканиране на сензорите и работа с паметта. На фигура 4-10 е показан обобщеният блоков алгоритъм на Активния режим.



фигура 4-10 – Блок алгоритъм на Активния Режим

При влизане в този режим системата се конфигурира в балансиран енергиен режим – микроконтролерът работи при номинална работна честота, а алгоритмите за управление на мощността изключват само сензорните региони на захранване. Разрешават се прекъсванията и микроконтролера се поставя в нискоенергиен режим, изчаквайки команда от потребителя. Стартира се и контролна система за следене на

потребителската активност – честота на подаване на командите и наличие на свързване с команден интерфейс (виж 4.3.1.2), която да превключи системата в Автономен режим при детектиране на потребителска неактивност. При подаване на команда от потребителя, системата се извежда от нискоенергийния режим, командата се декодира и се пристъпва към изпълнението ѝ.

Подаването на команда за сканиране на сензорите може да стане и посредством автоматичен процес. Автоматичният процес сканира сензорите, но не изпраща данни към потребителския интерфейс. Неговото използване е подходящо в два случая – когато е необходимо да се натрупат голям брой измервания от сензорите за статистически цели (бърз режим); и за събирането на регулярни записи в интервалите между експериментите/изследванията (бавен режим).

Командата за сканиране на сензорите стартира изпълнението на описания по-горе алгоритъм за диагностично сканиране на сензорите и компонентите на системата. Включените в този алгоритъм възможности за диагностициране и отстраняване на появили се по време на работата грешки и неизправности, го правят предпочитан за използване в нечувствителни към време за изпълнение режими. Това позволява на системата да извършва регулярна диагностика на сензорите и компонентите.

В случай на детектиране на грешка, от потребителски или системен характер, се стартира алгоритъма за управление на грешките (виж. 4.3.1.1). Този алгоритъм включва необходимите процеси за отстраняване на възникналите грешки, подходяща комуникация с потребителя и съхраняване на запис на събитието.

Системата поддържа серия от изпълними команди, които условно са групирани в четири функционални групи – Мрежови операции, Работа с паметта, Настройки, и Сервизен режим.

Работата с паметта включва командите за четене, запис и изтриване на паметта за данни. Предвидена е и команда позволяваща ръчното въвеждане на запис. Това позволява въвеждането на референтен запис, който да се използва по подходящ начин при анализа и синхронизирането на събраните данни.

Данните от сензорите се съхраняват в паметта в техния оригинален формат. За получаването на стойността на измерваната физична величина е необходимо оригиналните данни получени от аналогово-цифровите преобразуватели да се преобразуват по подходящ начин. Точността на измерването зависи от точността на преобразуване, а самото преобразуване е енергоемък процес изискващ определена изчислителна мощност. С цел повишаване на точността и намаляване на енергийната консумация от системата, операцията по преобразуване е интегрирана в програмата на потребителския интерфейс (4.3.3). Системата е предвидена да работи и с други системи, които не могат да преобразуват данните сами. Поради това, към алгоритмите на станцията е добавена и вградена функция за преобразуване на данните. При активиране на тази функция, всички данни изпращани към потребителя се преобразуват до техните физични стойности.

Групата на настройките включва команди и функции за общо конфигуриране на системата:

- Приоритизиране на региони – определяне на значимостта на сензорите от даден регион за провежданото измерване. На база на този приоритет се определя реда на изолиране на сензорите при необходимост от намаляване на консумацията на системата.
- Настройка и синхронизиране на часовника – командата за настройка на часовника извършва запис на точно време в регистрите на часовника; командата за синхронизиране на

часовника добавя към записа с данните и стойността на отклонението на часовника от глобалното време.

- Задаване на параметрите на автоматичния процес – стартиране и спиране на автоматичния процес за сканиране на сензорите; задаване интервалите на сканиране в бърз и бавен режим; превключване между бърз и бавен режим.
- Активиране и деактивиране на сензори – опция позволяваща изключването на част от сензорите от веригата на сканиране. Това позволява да се събират само данните необходими за извършваното измерване, без да е необходимо преконфигуриране на системата.
- Настройка на времето на неактивност – времето в което системата ще очаква команда от потребителя. Ако такава не се генерира в заявения времеви интервал, системата преминава към по-енергоэффективен режим.
- Активиране и деактивиране на функцията за преобразуване на данните.
- Задаване на идентификационен номер – необходим на системата за идентификация при работа в мрежови режим.
- Активиране и деактивиране работата на станцията в мрежови режим.
- Настройки на станцията за работа като базова или ретранслираща.
- Превключване на режими – команда за преминаване в режим на реално време и команда за преминаване в автономен режим.

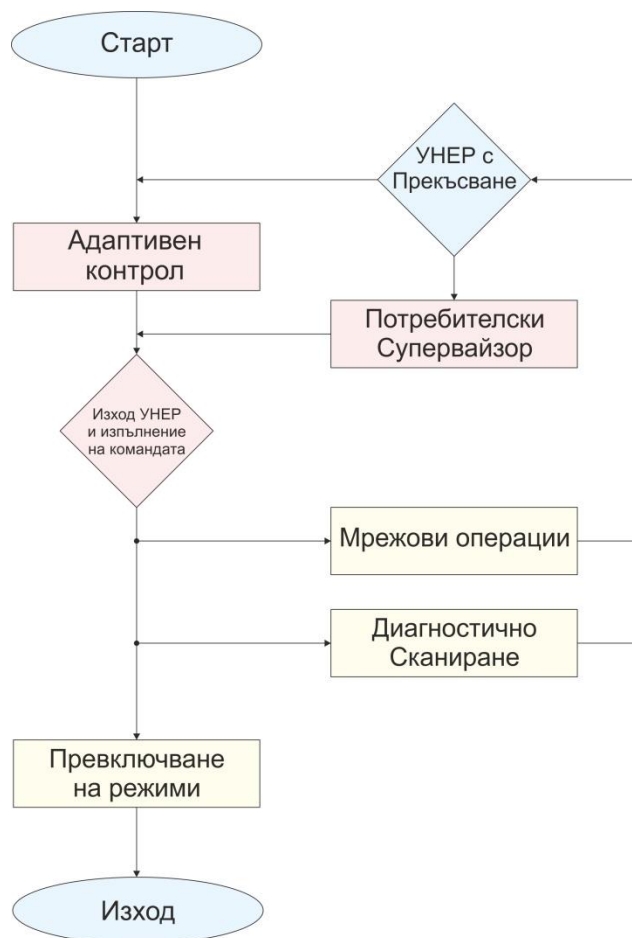
Мрежовите операции включват команди свързани с управлението на устройството при работа в мрежови режим – приемане, предаване и ретранслиране на данни и команди.

Сервизният режим включва функции и команди необходими за първоначалното конфигуриране на системата – стартиране на часовника, отключване на паметта, четене и запис на системни променливи, четене и

запис на статусни и контролни регистри на периферните устройства и микроконтролера. Функцията за конфигуриране работата на допълнителните сензори от разширителния блок, също влиза към тази група. Тук е предвидена и команда за рестартиране на системата. Тук принадлежи функционално и командата за статус на системата, която връща списък със стойностите на всички конфигурируеми параметри.

4.3.2.2 Автономен режим на работа

Автономният режим е проектиран да управлява системата по време на необслужваемия период на работа, както и в интервалите между активното използване на системата. В този режим системата се стреми да събира данни периодично, като същевременно запазва функционалността си максимално дълго време. На фигура 4-11 е представен обобщеният блоков алгоритъм на режима.



фигура 4-11 – Блоков алгоритъм на Автономния режим

Характерното за работата на този режим е алгоритъмът за контрол на автоматизацията. Този алгоритъм представлява опростена реализация на модела за адаптивен контрол описан в 4.3.1.3. Автоматичният контрол стартира с параметрите от бавния режим на автоматичния процес при активния режим. Системата анализира данните за оставащите ресурси – енергиен заряд и обем на паметта и на база статистически анализи на параметрите от предходни периоди, предефинирани приоритети и очаквания за продължителността на автономния период – извършва корекции в параметрите на работния режим (променя честота на запис, включва или изключва сензори от сканирането), създавайки оптимален график на работа на системата.

При работа в този режим системата се конфигурира в свръх ниско енергиен режим – микроконтролерът работи при понижена работна честота, а алгоритмите за управление на мощността изключват всички региони на захранване в интервалите между сканиранията. Разрешават се прекъсванията и микроконтролера се поставя в нискоенергиен режим изчаквайки автоматична команда от таймера за сканиране. Стартира се и контролна система за следене на потребителската активност – при подаване на команда от команден интерфейс, системата ще превключи в Активен режим и ще извърши диагностично сканиране на сензорите.

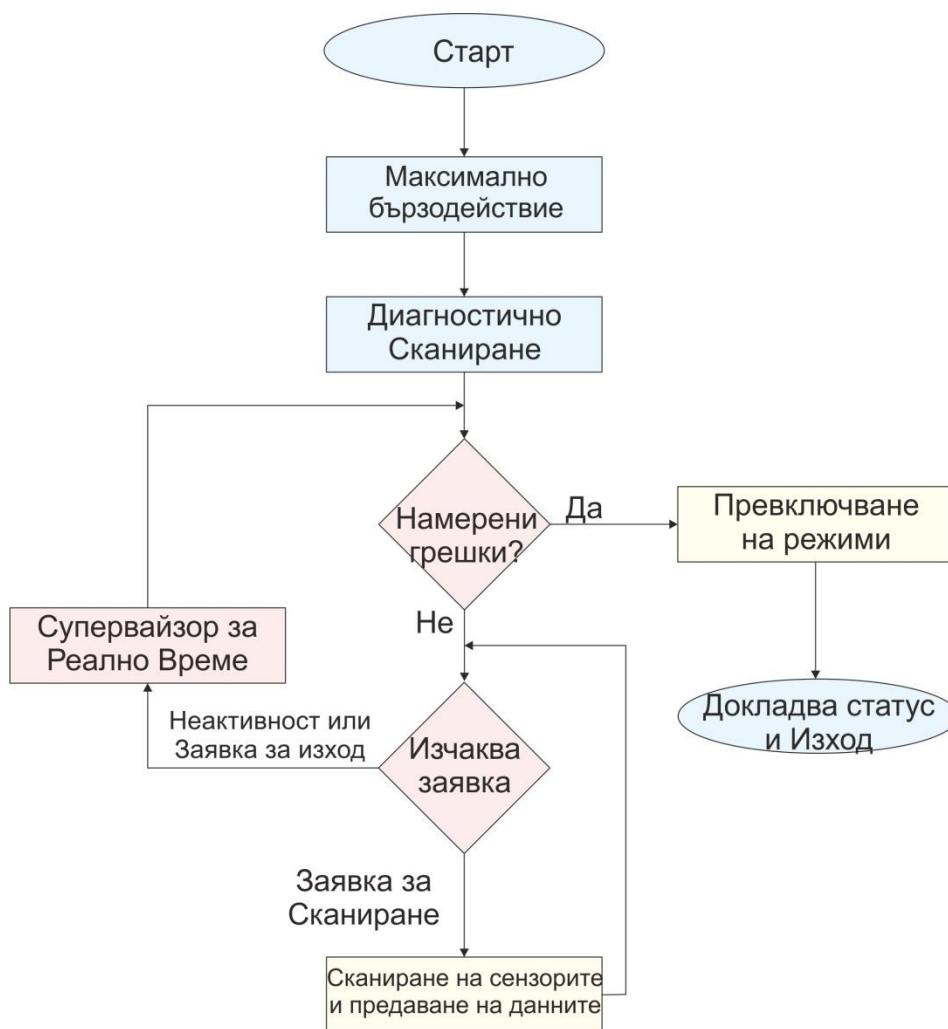
Сканирането на сензорите в този режим отново се извършва от алгоритъма за диагностично сканиране. Вградените възможности за диагностициране и отстраняване на появили се по време на работата грешки и неизправности, са предвидени именно за работа в този режим. Подобно на автоматичния процес в активния режим, не се изпращат данни към потребителския интерфейс след сканирането.

Ако е разрешена работата на системата в мрежови режим, всяка станция от мрежата периодично се свързва с базова или ретранслираща

станция, изпраща пакет от данни събрани за периода от последната връзка и се синхронизира по време.

4.3.2.3 Режим на работа в реално време

Режимът на работа в реално време е предвиден като средство за събиране и предоставяне на референтни данни за околната среда към външна система, с достатъчно бързодействие за да могат да се използват за контрол и управление на изследваната среда. На фигура 4-12 е представена блоковата диаграма на алгоритъма на работа в режим на измерване в реално време.



фигура 4-12 – Блок схема на работа в реално време

При влизането в този режим, системата се пренастройва за работа с максимално бързодействие – микроконтролерът се настройва за работа при

максимална честота, а алгоритмите за управление на мощността включват всички региони на захранване. Зареждат се параметрите за работа на системата – приоритети и сензорна верига за сканиране. Извършва се диагностично сканиране на системата за проверка на изправността на сензорите. Изчислява се времето за отговор на системата според текущата конфигурация и се изпраща на потребителя заедно с данните получени при диагностичното сканиране.

Тъй като системата може да бъде динамично конфигурирана, времето за отговор от системата се дефинира според работните настройки. То зависи от параметрите и броя на сензорите, които ще бъдат сканирани по време на всеки цикъл. Алгоритъмът на сканиране е структуриран така, че да конвейризира процеса на сканиране на сензорите, стартирайки заявките от най-бавните. В общия случай това позволява да се извърши сканиране на всички сензори за времето необходимо за получаване на данни от най-бавния сензор.

Стартира се и контролна система за следене на състоянието на системата. При прекъсване на връзката с контролния интерфейс или липса на заявка над определено време (конфигурируемо), системата генерира грешка от неактивност. Тази система следи и за грешки, които могат да се появят по време на работата на системата – отказ на сензор, късо съединение, ниски нива на захранването и т.н. Грешка ще се генерира и в случаите, когато системата не успее да генерира отговор в дефинирания времеви интервал.

При засичане на грешка или неизправност – системата превключва обратно в активен режим и докладва за възникналите грешки. При правилна конфигурация, системата подава сигнал за готовност по контролния интерфейс към външната система и визуално чрез светодиода за режим на готовност от вградения потребителски интерфейс. След

процедурата по установяване в готовност, системата преминава в режим на активно изчакване на команда от потребителя.

Поддържаните команди в този режим са:

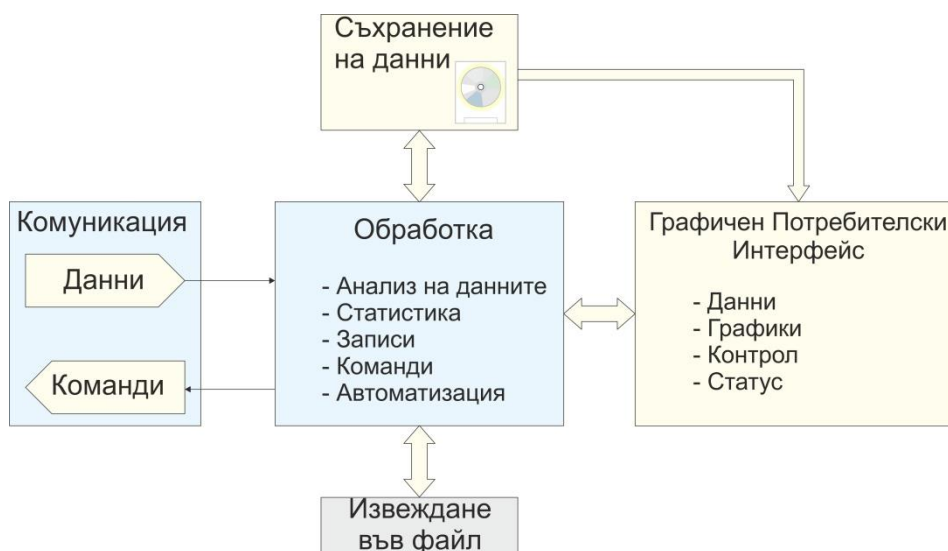
- Сканиране – извършва се сканиране на сензорите и предаване на данните по потребителския интерфейс.
- Изход – системата се връща в активен режим.

За да се намали времето за отговор на системата до минимум, при сканиране на сензорите в режим на реално време не се извършват диагностични проверки или обработка на прекъсвания. Единственото разрешено прекъсване е от таймера на контролната система за следене на състоянието, който функционира като стражеви таймер – при изтичане на максималното време за отговор прекратява сканирането и връща системата в активен режим.

4.3.3 Потребителски интерфейс

Системата може да бъде управлявана и настройвана чрез директно подаване на командите по сериен интерфейс чрез стандартен конзолен терминал. Това позволява системата да бъде свързвана и да работи както с компютърни системи, така и с автоматични системи поддържащи комуникация през сериен интерфейс.

Голямото разнообразие на опции и специфичните формати на различните команди и техните параметри правят директната работа със системата чрез терминален клиент относително трудна. За да се улесни директната работа със системата е разработено специализирано компютърно приложение. На фигура 4-13 е представена обобщената блокова структура на компютърното приложение за работа със станцията.



фигура 4-13 – Блокова схема на приложението

Приложението е структурирано около два основни функционални блока – обработка на информацията и графичния потребителски интерфейс. Към приложението са включени и три под-модулни блока:

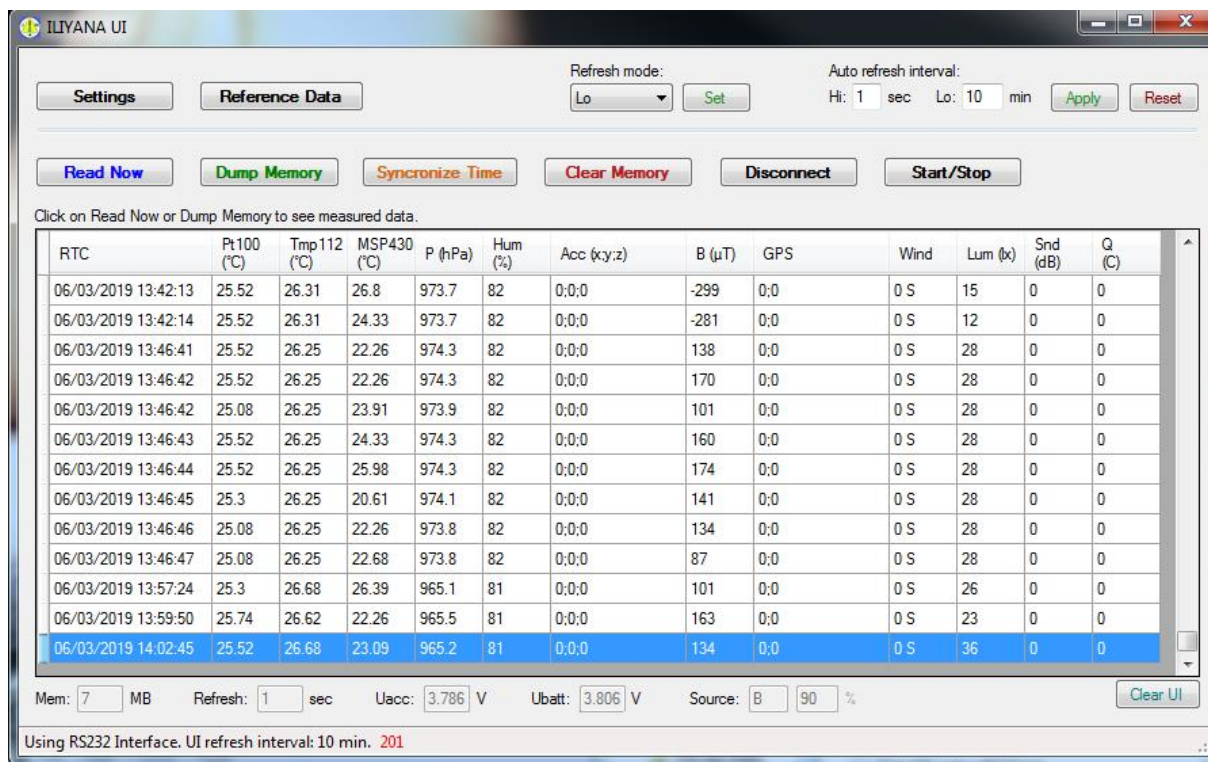
- Комуникационният блок включва драйверите и организирането на комуникацията през серийния интерфейс за връзка със системата.
- Блокът за съхранение на данните отговаря за работата с файловете на операционната система.
- Блокът за връзка с външна система, подобно на комуникационния блок, осигурява комуникацията с външна система и отговаря за прехвърлянето на необходимите данни.

Блокът за обработка на информацията включва основните алгоритми за преобразуване на данните и командите от и към системата. Той отговаря за правилното форматиране на зададените команди, декодирането на получените записи с грешки, обработката и съхранението на получените данни от системата. Предвидено е приложението да може да извършва преобразуването на данните получени директно от аналогово-цифровите преобразуватели на сензорите до крайни стойности на измерваните величини. Тази опция дава възможност за подобряване както на

цялостното бързодействие на системата, така и на точността на получените резултати.

Блока за обработка на информацията включва и модули за извършване на статистическа обработка на данните и командите при работа със системата, което се използва като основа за моделиране на параметрите на предефинираните алгоритми при работата на автономния режим.

Графичният потребителски интерфейс позволява да се задават различните параметри за настройка работата на станцията и на самото приложение. Той осигурява възможност за директно извеждане и визуализиране, както на данните получени в реално време от станцията, така и на данните от паметта. На фигура 4-14 е представен основният изглед на графичния потребителски интерфейс.



фигура 4-14 – Графичен потребителски интерфейс

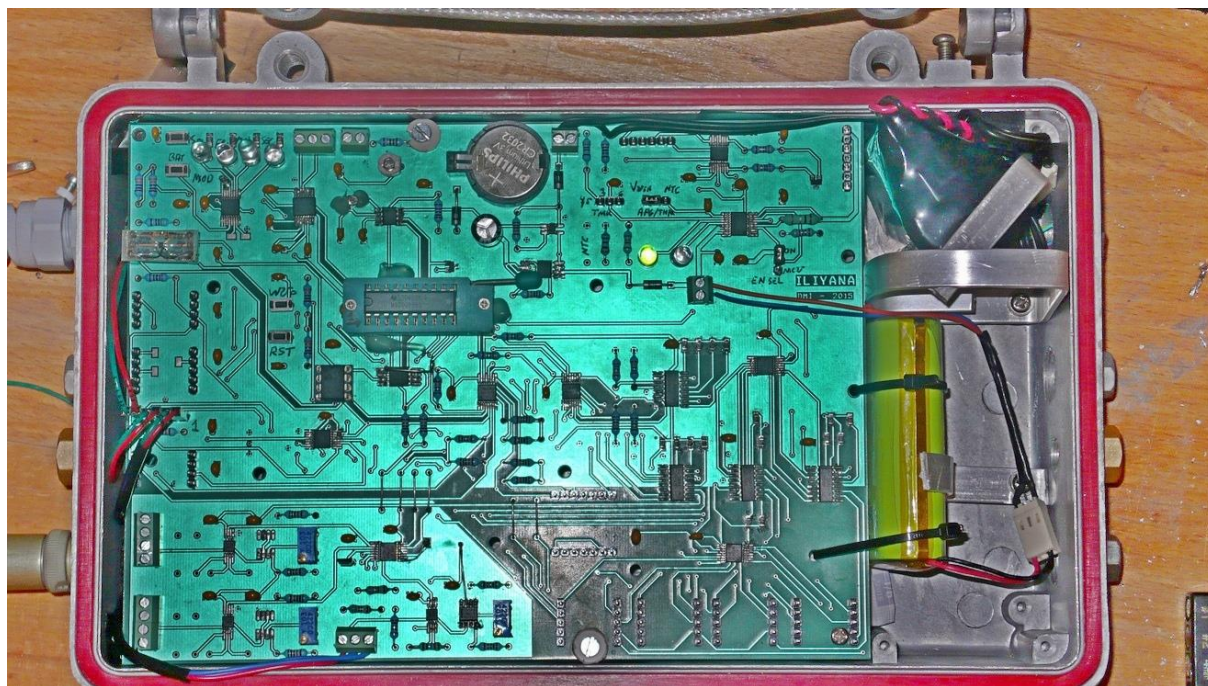
Графичният интерфейс предоставя и лесен достъп до широк набор от служебна информация – статус на грешките, обем на оставащата памет, напрежения и заряд на батерията.

Основните команди са изведени на бутони, за да се улесни работата на оператора. Такива са извличането на данните от паметта на системата, форматиране на паметта, синхронизиране по време, стартирането/спирането на режима в реално време и преминаването в автономен режим. Предвиден е и бутон за ръчна заявка за сканиране, който позволява изискване на данни от потребителя по всяко време.

С помощта на допълнителни менюта, графичният интерфейс позволява добавянето на референтни данни в паметта на системата, както и лесното задаване на настройките за работа.

4.4 Приложение на разработената система

Прототип на описаната измервателна система е подготвен за употреба на българската антарктическа база на остров Ливингстън, Южни Шетлъндски острови. Устройството е конфигурирано за работа със сензори за температура, влажност, налягане, магнитно поле и осветеност. На фигура 4-15 е показана снимка на прототипа на устройството.



фигура 4-15 – Прототип на системата

Основният сензор за измерване на температурата е изграден на базата на платинен терморезистор (Pt100) тип В съгласно модела разгледан в 2.1. Той е свързан по трипроводна схема към инструментален усилвател INA827 с външна корекция на офсата. Аналогово-цифровото преобразуване и подсигурено от 12 разрядния АЦП ADS7828 [102].

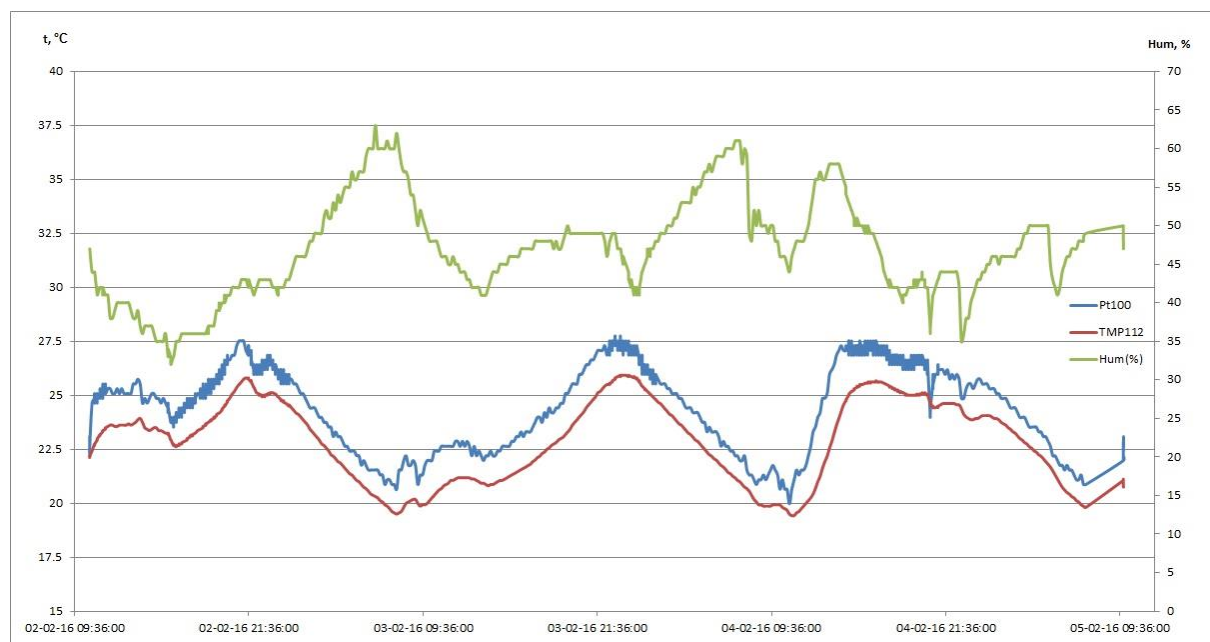
Допълнителният температурен сензор е от полупроводников тип (TMP112) и ролята му е да следи вътрешната температура на системата при входните преобразуватели и кварцовия резонатор на часовника за реално време.

Измерването на влажността е базирано на интелигентния сензор с вътрешна температурна компенсация и пълен обхват за измерване на относителна влажност - HDC1050. Точността на сензора е $\pm 3\%$.

Измерването на барометричното налягане е осигурено от друг интелигентен сензор – BMP180.

За измерване на осветеността се използва сензора OPT3001. Той представлява едночипов луксметър с широк измервателен диапазон (от 0.01 до 83k lux) и автоматична настройка на обхвата.

Устройството е изпратено в началото на месец Февруари 2016 година, по време на 24-та антарктическа експедиция. Системата е тествана в базата от където са събрани първоначални експериментални данни показани на фигура 4-16.

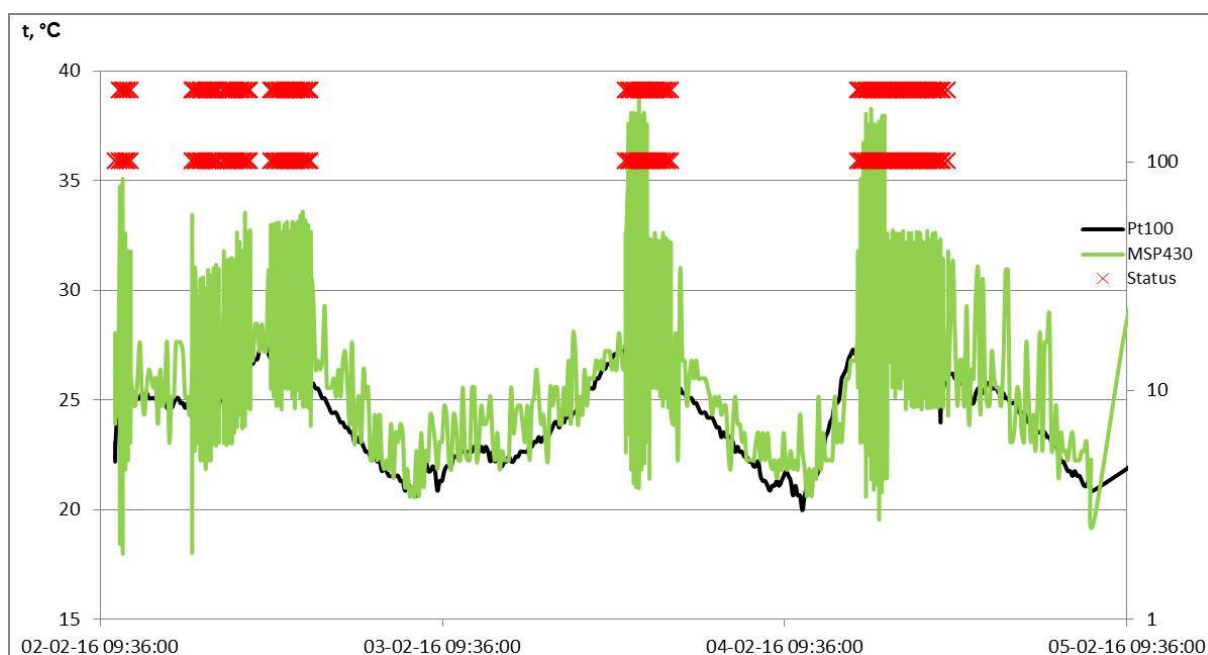


фигура 4-16 – Експериментални данни

Данните показват разлика между измерванията на двата температурни сензора в рамките на $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, което е в границите на допустимата грешка на полупроводниковият сензор. Забелязва се и значително по-голяма динамичност в отчитанията на платиненият терморезистор, което също е нормално и очаквано, предвид по-високата точност на измерване. От

графиката е видна и корелацията между измерената температура и относителната влажност.

Системата е настроена да записва данните и от вътрешния температурен сензор на микроконтролера. Въпреки, че този сензор отчита температура, неговите показания са по-ценни като средство за отчитане на процесорната активност. Както показва графиката на получените данни на фигура 4-17, измерените стойности от вътрешният сензор наистина следват тенденцията на температурното изменение, но точността е значително по-ниска.

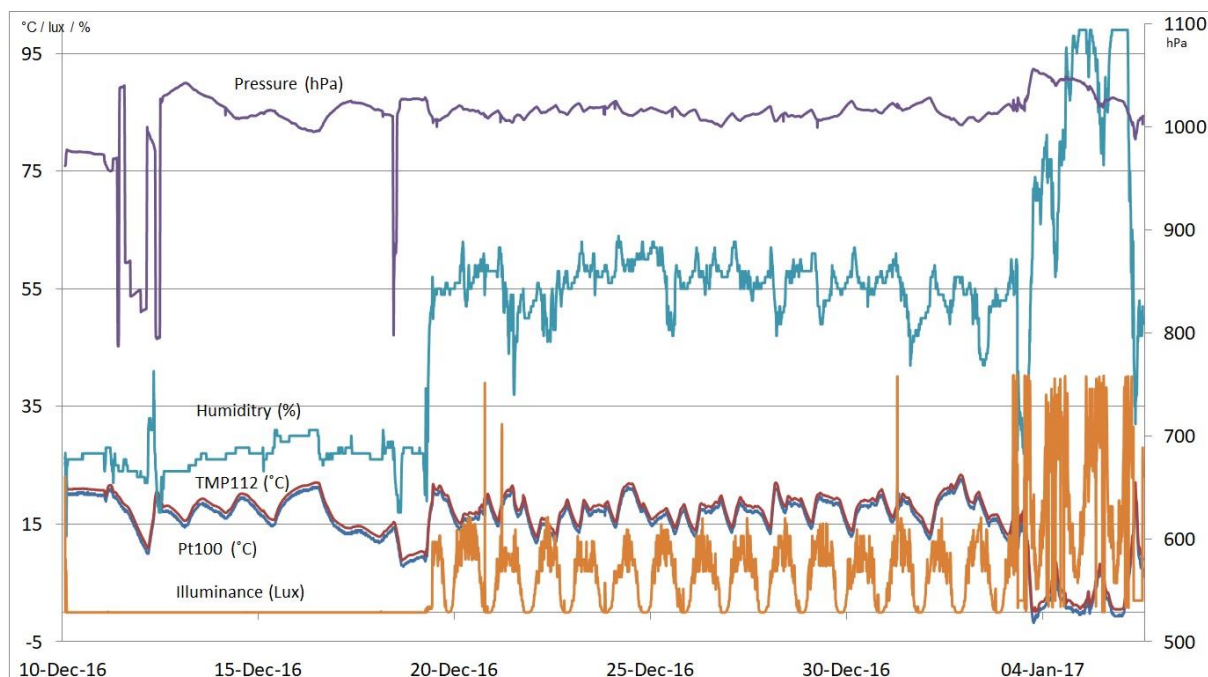


фигура 4-17 – Статусни данни

Интересното в отклонението на данните е, че съвпадат с периодите на операторски контрол, което е видно от статусните записи. Този ефект е очакван, тъй като при операторски контрол микроконтролерът работи при по-високо натоварване. Това дава възможност да се проследи активността на микроконтролера и в автономния режим, при изпълнение на автодиагностични процеси или операции по адаптиране на режима на работа.

В дизайна на устройството е заложено използването на акумулатор с капацитет 4,4 Ah. Това налага използването на заряден контролер от ново поколение, способен да поддържа висок заряден ток и да управлява независимо системен товар. По време на разработката на системата, зарядният контролер също е във фаза на разработка от производителя. По-късно е установено, че в прототипната версия използвана при разработката на системата има неизправност в дизайна на контролера, която блокира зареждането на акумулатора и подаването на ток към системния товар. Това води до превключване и активна работа на системата с резервно захранване през цялото време на нейното функциониране и довежда до изчерпване на захранването скоро след напускане на базата и настройването на системата за работа в автономен режим.

В началото на месец Декември 2016 година, по време на 25-та антарктическа експедиция, е изпратен втори прототип. Той е с модифициран заряден контролер и подобрения във фърмуера. На фигура 4-18 са представени данните от измерванията направени за периода от изпращането на системата до края на активния период на използването ѝ.

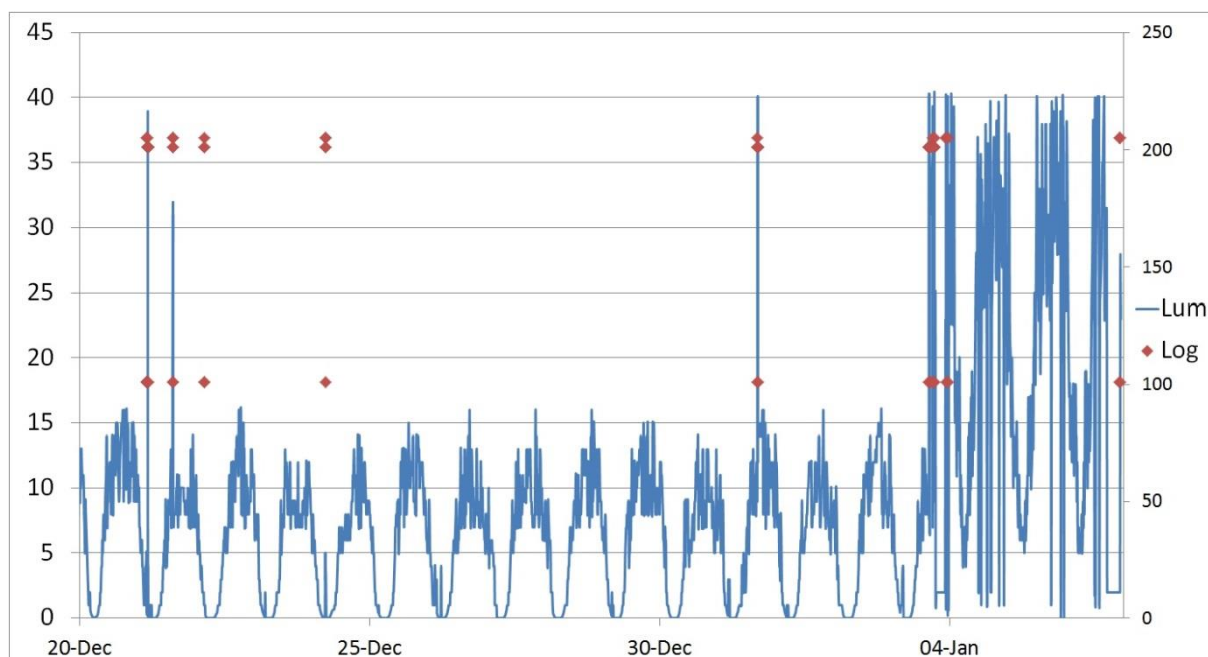


фигура 4-18 – Полеви измервания

От графиката са видни три ясно отличими периода на работа на системата.

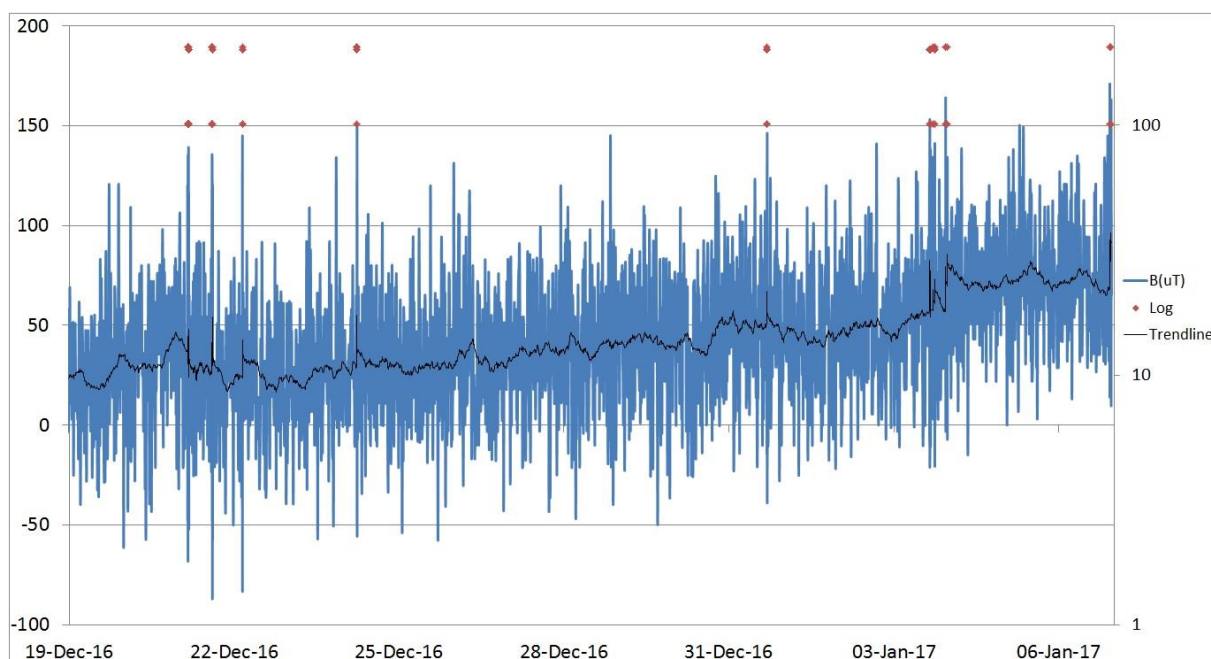
Първият период съдържа данните от транспортирането на системата до базата на остров Ливингстън. Той обхваща периода от 10-ти до 19-ти Декември 2016 г. Отличава се лесно поради минималните стойности отчетени от сензора за осветеност, който е покрит със защитна обвивка в този период. Резките спадове на температурата и налягането в този интервал са отчет за транспортирането на системата по въздух в товарния отсек на самолета.

През втория период е извършвана активна работа със системата. Системата е поставена в близост до останалата изследователска апаратура и предоставя референтни данни. Този период продължава около 2 седмици, което е ясно отличимо от дневните осцилации на осветеността. При разглеждане на данните в този период се забелязват и няколко пикове в осветеността. При съпоставянето на тези данни с данните от записите на системата отчитащи потребителската активност, се забелязва значително съвпадение. На фигура 4-19 е показана съпоставка на данните от сензора за осветеност със записите за потребителската активност.



фигура 4-19 – Осветеност и статусни данни

Вероятно обяснение за тези смущения е човешката дейност около системата. Тази хипотеза се подкрепя и от данните на магнитния сензор за същия период, показани на фигура 4-20.

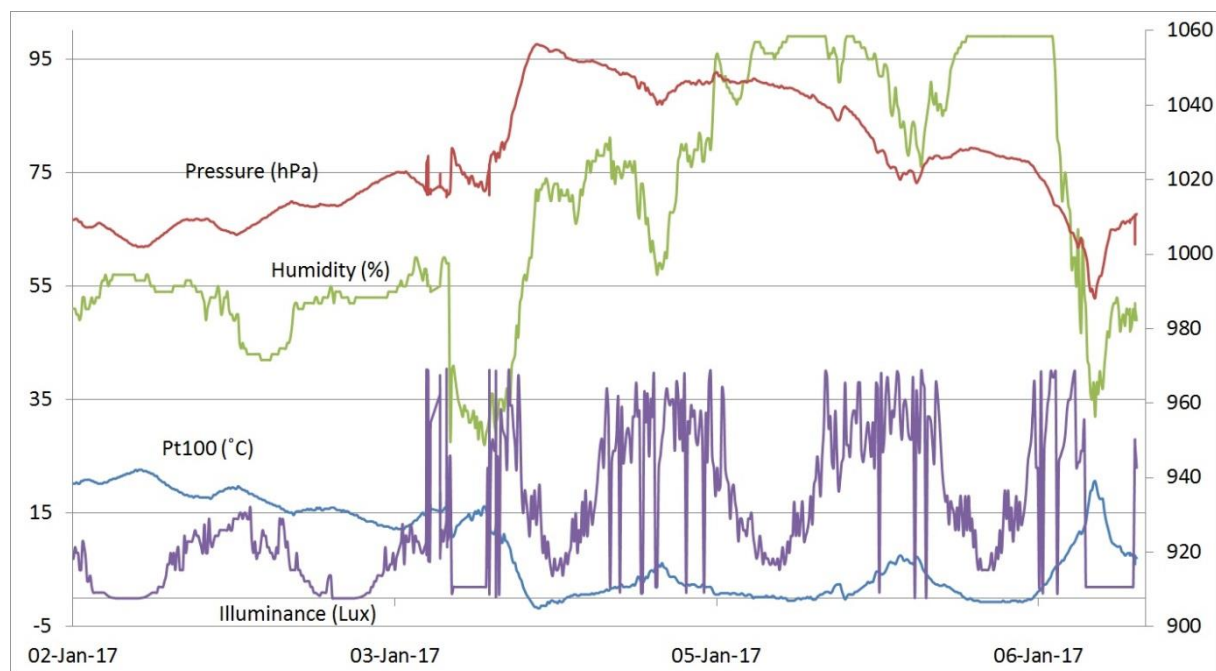


фигура 4-20 – Данни от магнитния сензор

Следенето на магнитното поле се извършва от аналогов сензор DRV5053 използващ ефекта на Хол. Инсталирането на такъв тип сензор няма за цел да следи изменението на земния магнитен фон или ориентацията на системата, а по-скоро да предоставя данни за възможна поява на силни магнитни полета, които могат да повлияят на измерванията. Въпреки това, благодарение на слабата зашуменост в района, се забелязва тенденция в данните за проследяване и на двете величини. Особено характерен в това отношение е преходът между втория и третия период в данните, когато се извършва т. нар. „зазимяване“ на станцията.

Третият период отразява данните от станцията, след като тя е била подготвена за зимния период. Фактически това са последните дни преди напускането на базата за зимния сезон. Данните от този период са показани по-ясно на фигура 4-21. На графиката ясно е отлчиимо

засенчването на сензора за осветеност, което съвпада и с турбуленцията в данните от магнитния сензор.



фигура 4-21 – Данни от третия период

В този период станцията е била преместена и закрепена за масивна метална мачта, където да прекара полярната зима. Последните данни от системата са изтеглени на 6-ти Януари 2017г.

4.5 Изводи

В края на 2017г. 26-та експедиция се завръща на остров Ливингстън и докладва за щети нанесени от значителна буря през изминалия зимен сезон, включително на пилона и станцията. Станцията е открита, но със сериозни поражения по корпуса, хранващите проводници на резервната батерия и интерфейсите схеми. Поради проблеми с логистиката връщането на станцията е забавено значително. Станцията е върната в София през Септември 2018.

Работи се по намаляването на размерите на системата и създаването на мрежа от станции за многоточково отчитане физичните параметри на околната среда.

4.6 Постигнати резултати

1. Създаден е прототип на адаптивна система за измерване параметрите на околната среда, позволяващ както работа в реално време така и извършването на дълговременни измервания, при екстремни условия и ограничен капацитет на хранящия източник.
2. Предложена е методика за намаляване на консумираната енергия от системата по време на интервалите между сканиранията. Изследвано е влиянието на предложеното решение върху точността на провежданите измервания, установено е, че метрологичните характеристики на апаратурата се запазват.
3. Предложени са модели на адаптивни алгоритми за управление на работните режими, за управление темпа на натрупване на данни при дълговременни измервания, за самодиагностика и управление на грешките, които позволяват ефективно управление на системата и значително подобряващ взаимодействието с оператора.
4. Разработено е софтуерно осигуряване за управление на системата и са интегрирани набор от адаптивни алгоритми за самодиагностика, управление на работните режими и ефективно управление на системните ресурси.
5. Разработено е компютърно приложение с графичен потребителски интерфейс за работа със системата, улесняващо конфигурирането, настройката и извличането на данните от апаратурата.
6. Със създадената апаратура са извършени множество експерименти и измервания, потвърждаващи възможността ѝ за употреба в полеви условия и определяне дълговременните промени на физични параметри на средата при екстремни условия.

Заклучение

В дисертационния труд е направен преглед на методите и средствата за измерване на основни метеорологични параметри – температура, влажност, атмосферно налягане, скорост и посока на вятъра. Акцентирано е на особеностите, свързани с комбинираната работа в реално време и дълговременни измервания в необслужваеми райони и при екстремни условия на средата. Изследвана е работата на разнотипни сензори с оглед оптимизиране на схемните решения и режими на работа за осигуряване на висока прецизност при много ниско енергопотребление. Застъпени са въпросите за прецизна калибровка на създадените системи от сензори и измервателна апаратура, чрез прилагане на сравнителни и алгоритмични процедури.

В дисертационния труд са постигнати следните по-важни резултати:

1. Аналитично и експериментално са изследвани източниците на грешки при измерване на:
 - Температура с терморезистори Pt100 и цифров сензор TMP112. Предложени и проведени са процедури за повишаване точността на калибрирането чрез привързване към контролна точка или към показание на контролен термометър.
 - Относителна влажност с цифров сензор за влажност HDC1080. Предложена и проведена е процедура за калибриране на сензора чрез привързване към контролна точка.
 - Атмосферно налягане с цифров сензор BMP180. Предложен е метод за повишаване точността на сензора чрез привързване към фиксирана точка от равновесната крива на водата.
2. Предложено е оригинално решение за изграждане на система за измерване параметрите на вятъра при работа в екстремни условия, базирано на тензометрични сензори. Изследвани са теоретичните

принципи, влиянието на параметрите на околната среда и е извършен анализ на характеристиките на предложеното решение.

3. Построен е прототип на тензометричен анемометър. Разработена и експериментирана е схема за снемане и регистриране на сигналите от тензометричните сензори на прототипа. Проведени са експерименти за определяне работоспособността на системата и е предложена процедура за определяне на скоростта на вятъра и посоката му от регистрираните данни от тензометричните канали.
4. Предложени и експериментирани са модели на адаптивни алгоритми за управление на работните режими, за управление темпа на натрупване на данни при дълговременни измервания, за самодиагностика и управление на грешките, които позволяват ефективно управление на системата.
5. Разработени са схемни и програмни средства за регистриране параметрите на околната среда в екстремни условия, с възможност за динамична промяна на режима от работа в реално време към дълговременни измервания и обратно. Анализирани са проблемите, които възникват при дълговременни измервания в необслужваеми зони в полеви условия и е създадена апаратура за непрекъснати метеорологични измервания и референтни данни в реално време.

Резултатите от изследванията и разработените средства са намерили приложение в научноизследователски проект по договор И02/11/2014 между Националния фонд "Научни изследвания" и Българска академия на науките – Национален институт по геофизика, геодезия и география, на тема „Създаване на информационна база за изследване на сеизмичността и структурата на о. Ливингстън и околностите чрез провеждане на комплексни проучвания в района на Българската антарктическа база“, София 2014.

Приноси на дисертационния труд

Научно-приложни приноси

1. Аналитично са изведени и експериментално изследвани източниците на грешки при измерване на температура, атмосферно налягане и относителна влажност. Предложени и проведени са сравнителни и аналитични калибровъчни процедури водещи до повишаване точността на инструментите.
2. Аналитично са изведени и изследвани зависимостите при определяне скорост и посока на вятъра с оригинално решение на анемометър без движещи се части, базиран на тензометрични сензори, подходящ за работа в екстремни условия. Изследвано е теоретично влиянието на факторите на околната среда върху работата на прибора и е извършен анализ на характеристиките на предложеното решение.
3. Предложена е и е изследвана схема за снемане на сигнала от тензосензорите на анемометъра. Разработена е методика за обработка на постъпващите експериментални данни. Анализирани са източниците на грешки и са предложени насоки за отстраняването и компенсирането им. Получените експериментални данни потвърждават приложимостта на предложеното оригинално решение.
4. Предложени и експериментирани са схемотехнични решения и системни алгоритми, способстващи за подобряване на работните характеристики на системата – енергоефективност, адаптивност, самодиагностика и управление на грешките.

Приложни приноси

5. Създадена е многопараметрична полева апаратура за регистриране параметрите на околната среда в екстремни условия, с интегрирани режими за дълговременно натрупване на данни, работа в реално време и контролно-диагностична настройка.
6. Разработено е софтуерно осигуряване за управление на системата, включващо алгоритми за подобряване енергоефективността, адаптивността, самодиагностиката и управлението на грешките. Разработено е компютърно приложение с графичен потребителски интерфейс за работа със системата.

Публикации по дисертацията

- [1] D. M. Iliev, V. N. Gourev and M. G. Mitev, "Design of Adaptive Weather Station with Reduced Power consumption", Proc. XXIV International Scientific Conference Electronics (ET), Sozopol, 2015. ISSN 1314-0078.
- [2] D. M. Iliev, V. N. Gourev and M. G. Mitev, "Development of Software Environment for Adaptive Weather Station with Reduced Power Consumption", Proc. XIII National Scientific Conference "Electronics 2016", Sofia, 2016.
- [3] D. M. Iliev, V. N. Gourev and M. G. Mitev, "Realization of adaptive weather station for work in Antarctic conditions", Proc. XXV International Scientific Conference Electronics (ET), pp. 131-133, 2016, ISBN 978-1-5090-2881-8, IEEE Catalog Number CFP16H39-CDR Sozopol, 2016, doi: 10.1109/ET.2016.7753487.
- [4] D. M. Iliev, M. G. Mitev and V. N. Gourev, "Design of strain gauge anemometer for work in Antarctic conditions" 2017 XXVI International Scientific Conference Electronics (ET), Sozopol, 2017. doi: 10.1109/ET.2017.8124366. ⁽¹⁾
- [5] Dian Iliev, "Data Analysis and Improvement of Adaptive Weather Station for Work in Antarctic Conditions", Proc. 53rd International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies (ICEST) – Sozopol, Bulgaria, 2018. ISSN: 2603-3259 ⁽²⁾
- [6] D. M. Iliev, "Research and Development of a Strain Gauge Anemometer," 2018 IEEE XXVII International Scientific Conference Electronics - ET, Sozopol, 2018, doi: 10.1109/ET.2018.8549662
- [7] D. M. Iliev, E. N. Dimitrov and M. G. Mitev, "Design Requirements and Static Performance Analysis of a Strain Gauge Anemometer," 2019 IEEE XXVIII International Scientific Conference Electronics (ET), Sozopol, Bulgaria, 2019, doi: 10.1109/ET.2019.8878656

Забелязани цитирания:

- (1) Xin, Canjie and Guan, Mingzhi. (2018). Shallow Embedded Strain Measurements and Analysis for a NbTi Superconducting Sextupole Coil During Cooling, Excitation, and Quench. Journal of Superconductivity and Novel Magnetism. 32. 10.1007/s10948-018-4704-x.

Награди:

- (2) Best Paper Award on 53rd International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies (ICEST).

Използвана литература

- [1] Ирена Атанасова (2018), Създаване на експертни системи, Университетско издателство „Неофит Рилски“, ISBN: 978-954-00-0163-0
- [2] Максимов М. Основи на Физиката част I, София, „Булвест 2000“ 2006, ISBN 978-954-18-0163-5
- [3] Нишева М., Д. Шишков. Изкуствен интелект, Добрич, „Интеграл“, 1995,
- [4] F. S. A. Aziz, S. I. Sulaiman and H. Zainuddin, "A prototype of an integrated pyranometer for measuring multi-parameters," 2013 IEEE 9th International Colloquium on Signal Processing and its Applications, Kuala Lumpur, 2013, pp. 73-77. doi: 10.1109/CSPA.2013.6530017
- [5] Ben-Ari, M., "Principles of Concurrent and Distributed Programming", Prentice Hall, 1990. ISBN 0-13-711821-X.
- [6] K. Biondi *et al.*, "Air Pollution Detection System using Edge Computing," 2019 *International Conference in Engineering Applications (ICEA)*, Sao Miguel, Portugal, 2019, doi: 10.1109/CEAP.2019.8883458
- [7] T. G. Birdsall, "Signals and signal processing for acoustic monitoring of ocean processes," 1995 *International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Detroit, MI, USA, 1995, vol.5. doi: 10.1109/ICASSP.1995.479418
- [8] Michael Boxwell, *Solar Electricity Handbook: A Simple, Practical Guide to Solar Energy* (2017)
- [9] I.R. Calder, C.H.R. Kidd, "A note on the dynamic calibration of tipping-bucket gauges," *Journal of Hydrology*, vol. 39, pp. 383-386, 1978.
- [10] H. Capdevila, V. Naidoo and M. Graeber, "Soiling forecast and measurements for large PV power generation projects in dessert environments," 2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Portland, OR, 2016, doi: 10.1109/PVSC.2016.7749994
- [11] A. P. Catalano, V. d'Alessandro, P. Guerriero and S. Daliento, "Diagnosis of power losses in PV plants by means of UAV thermography," 2019 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), Otranto, Italy, doi: 10.1109/ICCEP.2019.8890233
- [12] Çengel, Yunus A.; Boles, Michael A. (1998). *Thermodynamics – An Engineering Approach*. McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering (5th ed.). Boston, MA.: McGraw-Hill. ISBN 978-0-07-011927-7.
- [13] Y. Chen, R. Ghannam and H. Heidari, "Air Quality Monitoring using Portable Multi-Sensory Module for Neurological Disease Prevention," 2019 *UK/ China Emerging Technologies (UCET)*, Glasgow, United Kingdom, 2019, doi: 10.1109/UCET.2019.8881892
- [14] M. Colli, L.G. Lanza, P. La Barbera, "Performance of a weighing rain gauge under laboratory simulated time-varying reference rainfall rates," *Atmospheric Research*, vol. 131, pp. 3-12, 2013.
- [15] N. V. Dorofeev, "Metod of determining the epicenter of geomagnetic disturbance," 2013 *IEEE 7th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS)*, Berlin, 2013, doi: 10.1109/IDAACS.2013.6663040
- [16] D. V. Efanov, G. V. Osadchy, V. V. Khóroshev and D. A. Shestovitskiy, "Diagnostics of Audio-Frequency Track Circuits in Continuous Monitoring Systems for Remote Control Devices: Some Aspects," 2019 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS), Batumi, Georgia, 2019, doi: 10.1109/EWDTS.2019.8884416

- [17] L. Feng, L. Yan and Z. Qing, "Acquisition and application of running state information on automatic weather station," 2017 13th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI), Yangzhou, 2017, doi: 10.1109/ICEMI.2017.8265795
- [18] W. G. Fenton, T. M. McGinnity and L. P. Maguire, "Fault diagnosis of electronic systems using intelligent techniques: a review," in *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, vol. 31, no. 3, pp. 269-281, Aug. 2001. doi: 10.1109/5326.971655
- [19] R. Gao, J. Ye and X. Xin, "An integrated biological analysis and flow rate sensing for the real-time detection of carcinogen in water based on Co²⁺-doped optical fibers," in *IEEE Sensors Journal*. doi: 10.1109/JSEN.2019.2948964
- [20] Giebardt, Jochen (2010), Chapter 11: Wind turbine condition monitoring systems and techniques. In Dalsgaard Sørensen, John; N Sørensen, Jens (eds.). *Wind Energy Systems: Optimising design and construction for safe and reliable operation*. Elsevier. ISBN 9780857090638.
- [21] Gorse, C.; Johnston, D.; Pritchard, M. (2012). *A Dictionary of Construction, Surveying, and Civil Engineering*. Oxford Quick Reference. OUP Oxford. p. 960. ISBN 978-0-19-104494-6.
- [22] L. Greenspan: Humidity Fixed Points of Binary Saturated Aqueous Solutions. *JOURNAL OF RESEARCH of the National Bureau of Standards-A. Physics and Chemistry* Vol. 81 A, No. 1, January-February 1977
- [23] A. C. Gurbuz, J. H. McClellan, W. R. Scott and G. D. Larson, "Seismic Tunnel Imaging and Detection," *2006 International Conference on Image Processing*, Atlanta, GA, 2006, doi: 10.1109/ICIP.2006.312911
- [24] Hayes-Roth, Frederick; Waterman, Donald; Lenat, Douglas (1983), *Building Expert Systems*, Addison-Wesley, ISBN 978-0-201-10686-2.
- [25] Heiβelmann H., Hölling M., Peinke J. (2009) The Sphere Anemometer – A Fast Alternative to Cup Anemometry. In: Peinke J., Oberlack M., Talamelli A. (eds) *Progress in Turbulence III*. Springer Proceedings in Physics, vol 131. Springer, Berlin, Heidelberg, Print ISBN 978-3-642-02224-1
- [26] A. Holovatyy, V. Teslyuk, M. Lobur, Y. Sokolovskyy and S. Pobereyko, "Development of Background Radiation Monitoring System Based on Arduino Platform," 2018 IEEE 13th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT), Lviv, 2018, doi: 10.1109/STC-CSIT.2018.8526696
- [27] Holton Gerald James, Brush Stephen G. – *Physics, the human adventure: from Copernicus to Einstein and beyond*, *Physics Today* (3rd ed.) 2001, Rutgers University Press, DOI:10.1063/1.1420555, ISBN 978-0-8135-2908-0
- [28] Islam, Tanvir; Rico-Ramirez, Miguel A.; Han, Dawei; Srivastava, Prashant K. (2012). "A Joss-Waldvogel disdrometer derived rainfall estimation study by collocated tipping bucket and rapid response rain gauges". *Atmospheric Science Letters*. 13 (2): 139–150. Bibcode:2012AtScL..13..139I. doi:10.1002/asl.376
- [29] Jacob, Daniel J. (1999). *Introduction to Atmospheric Chemistry*. Princeton University Press. ISBN 9780691001852.
- [30] C. Jani and S. Patel, "Metasurface based far infrared solar absorber," 2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting, Atlanta, GA, USA, 2019, doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2019.8888444
- [31] Kapartis, Savvas (1999), Anemometer employing standing wave normal to fluid flow and travelling wave normal to standing wave, U.S. Patent 5,877,416

- [32] Karger, Dirk Nikolaus; et al. (2016), Climatologies at high resolution for the Earth land surface areas, doi:10.1038/sdata.2017.122
- [33] C. Kuo, S. Chen, W. Liu and H. Chang, "The fiber grating rain gauge," 2018 7th International Symposium on Next Generation Electronics (ISNE), Taipei, 2018, doi: 10.1109/ISNE.2018.8394696
- [34] K. Lacanette. Temperature Handbook, National Semiconductor Corporation, 1997
- [35] Lide, David R., ed. (2004). CRC Handbook of Chemistry and Physics. CRC Press. ISBN 978-0-8493-0485-9.
- [36] Makkonen, Lasse; Lehtonen, Pertti; Helle, Lauri (2001). "Anemometry in Icing Conditions". Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 18 (9): 1457. doi:10.1175/1520-0426(2001)018<1457:AIIC>2.0.CO;2.
- [37] M. Mallick and A.Kumar, "Study on Drag Coefficient for the Flow Past a Cylinder", International Journal of Civil Engineering Research, Volume 5, Number 4(2014), pp. 301-306, ISSN 2278-3652
- [38] M. B. Marinov, I. Topalov, B. Ganev, E. Gieva and V. Galabov, "UAVs Based Particulate Matter Pollution Monitoring," 2019 IEEE XXVIII International Scientific Conference Electronics (ET), Sozopol, Bulgaria, 2019, doi: 10.1109/ET.2019.8878586
- [39] M. B. Marinov, N. Djeranova, B. Ganev, G. Nikolov and E. Janchevska, "Performance Evaluation of Low-cost Carbon Dioxide Sensors," 2018 IEEE XXVII International Scientific Conference Electronics - ET, Sozopol, 2018, doi: 10.1109/ET.2018.8549621
- [40] Martin, James (1965). Programming Real-time Computer Systems. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall Inc. ISBN 0-13-730507-9.
- [41] Maxwell, James Clerk (1908). Theory of Heat (9th ed. 2001). Courier Dover Publications. ISBN 978-0-486-41735-6.
- [42] Mayer, Stephanie & Reuder, Joachim & Schween, Jan. (2005). Calibration of capacitive humidity sensors for atmospheric sounding by remotely piloted vehicles.
- [43] Gerard C.M. Meijer, Guijie Wang, Ali Heidary (2018), Smart temperature sensors and temperature sensor systems. 10.1016/B978-0-08-102055-5.00003-6.
- [44] Mitev, M. G., P. V. Sapundjiev, L. T. Tsankov, G. G. Zhelyazkov. Optimal Signal Extraction from Light-Sensors when Measuring Solar Radiation Intensit. Annual Journal of Electronics, 2010, ISSN 1313-1842, Volume 4, No2, p-p 58 - 61.
- [45] A. Molini, P. La Barbera, L.G. Lanza, L. Stagi, "Rainfall intermittency and the sampling error of tipping-bucket rain gauges," Physics and Chemistry of the Earth, Part C: Solar, Terrestrial & Planetary Science, vol. 26, pp. 737-742, 2001.
- [46] J. Montgomery, "A real-time traffic and weather reporting system for motorists," Second IEEE Consumer Communications and Networking Conference, 2005. CCNC. 2005, Las Vegas, NV, 2005, doi: 10.1109/CCNC.2005.1405242
- [47] A. Munandar, H. Fakhurroja, M. I. Rizqyawan, R. P. Pratama, J. W. Wibowo and I. A. F. Anto, "Design of real-time weather monitoring system based on mobile application using automatic weather station," 2017 2nd International Conference on Automation, Cognitive Science, Optics, Micro Electro-Mechanical System, and Information Technology (ICACOMIT), Jakarta, 2017, doi: 10.1109/ICACOMIT.2017.8253384
- [48] V. R. Mutha, N. Kumar and P. Pareek, "Real time standalone data acquisition system for environmental data," 2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES), Delhi, 2016, doi: 10.1109/ICPEICES.2016.7853337

- [49] S. A. Oliveira, V. S. G. M. Tenorio and R. C. S. Freire, "Sensitivity Analysis of Controlled-Temperature Thermoresistive-based Radiometers," 2019 4th International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers (INSCIT), Sao Paulo, Brazil, 2019, doi: 10.1109/INSCIT.2019.8868453
- [50] Patrick Henry Winston, *Artificial Intelligence*, 3rd Edition, Addison-Wesley, 1992.
- [51] C. Paul, F. H. Heidler and W. Schulz, "Optical Lightning Measurement System and First Results," *2018 34th International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Rzeszow, 2018, doi: 10.1109/ICLP.2018.8503277
- [52] E. Pawłowski, "Single Sensor Hot-Wire Anemometer Based on Thermal Time Constant Estimation," 2018 XV International Scientific Conference on Optoelectronic and Electronic Sensors (COE), Warsaw, doi: 10.1109/COE.2018.8435154
- [53] Perry, R.H. and Green, D.W, (2007) *Perry's Chemical Engineers' Handbook* (8th Edition), Section 12, Psychrometry, Evaporative Cooling and Solids Drying McGraw-Hill, ISBN 978-0-07-151135-3
- [54] B. T. Philip, D. S. Kelley, E. A. Solomon and J. R. Delaney, "Monitoring methane emissions at Southern Hydrate Ridge using an OOI Cabled Array Acoustic Doppler Current Profiler," *OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey*, Monterey, CA, 2016, doi: 10.1109/OCEANS.2016.7761469
- [55] Pitot, Henri (1732), *Description d'une machine pour mesurer la vitesse des eaux courantes et le sillage des vaisseaux*, Histoire de l'Académie royale des sciences avec les mémoires de mathématique et de physique tirés des registres de cette Académie.
- [56] Planton, Serge (France; editor) (2013). "Annex III. Glossary: IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change". IPCC Fifth Assessment Report. p. 1450
- [57] D.K. Roveti. Choosing a Humidity Sensor: A Review of Three Technologies. *Sensors Magazine* (2001).
- [58] Russell, Stuart J.; Norvig, Peter (2010), *Artificial Intelligence: A Modern Approach* (3rd ed.), Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, ISBN 0-13-790395-2
- [59] Sapundjiev, P. V., M. G. Mitev, V. D. Manoev. Air Pressure Measurement Using Silicon Based Analog Sensor SPD015A. *Proceedings of the Technical University – Sofia*, volume 58, book 2, pp 75-80, ISSN 1311-0829, Sofia 2008.
- [60] Sapundjiev, P. V. Air Humidity Measurement Using The Psychrometric Method. *Annual Journal of Electronics*, 2009, ISSN 1313-1842.
- [61] Sapundjiev P., G. Zhelyazkov, M. Mitev, Rainfall Drops Measurements Using a Modified Lord Kelvin Generator. *Annual Journal of Electronics*, 2011, ISSN 1313-1842, Volume 5, No2, p-p 25-28.
- [62] Selin, Helaine (2008). *Encyclopaedia of the History of Science, Technology, and Medicine in Non-Western Cultures* (2nd ed.). Springer, ISBN 978-1402045592.
- [63] Shepherd, Dr. J. Marshall; Shindell, Drew; O'Carroll, Cynthia M. (1 February 2005). "What's the Difference Between Weather and Climate?", NASA.
- [64] J. Shi, C. Xu, J. Guo and Y. Gao, "Real-Time GPS Precise Point Positioning-Based Precipitable Water Vapor Estimation for Rainfall Monitoring and Forecasting," in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 53, no. 6, pp. 3452-3459, June 2015. doi: 10.1109/TGRS.2014.2377041
- [65] M. Stagnaro, M. Colli, L.G. Lanza, P.W. Chan, "Performance of postprocessing algorithms for rainfall intensity using measurements from tipping-bucket rain gauges," *Atmospheric Measurement Techniques*, vol. 9 (12), pp. 5699-5707, 2016.
- [66] Strangeways, Ian (2011). *Precipitation: Theory, Measurement and Distribution*. Cambridge University Press (published April 14, 2011). p. 140. ISBN 978-0521172929.

- [67] V. Tatsiankou, K. Hinzer, H. Schriemer, J. Haysom and R. Beal, "A novel instrument for cost-effective and reliable measurement of Solar Spectral Irradiance," 2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), New Orleans, LA, 2015, doi: 10.1109/PVSC.2015.7356407
- [68] L. Trichtchenko and D. H. Boteler, "Effects of Recent Geomagnetic Storms on Power Systems," *2007 7th International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology*, Saint-Petersburg, doi: 10.1109/EMCECO.2007.4371706
- [69] J. C. Tu, "Cockpit weather information (CWIN) system," 16th DASC. AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference. Reflections to the Future. Proceedings, Irvine, CA, USA, 1997, doi: 10.1109/DASC.1997.636194
- [70] G.J.G. Upton, A.R. Rahimi, "On-line detection of errors in tipping-bucket raingauges," *Journal of Hydrology*, vol. 278, pp. 197-212, 2003.
- [71] Zhenhai Wang and C. H. Chen, "Factor Analysis for Geophysical Signal Processing with Seismic Profiles," *The 2006 IEEE International Joint Conference on Neural Network Proceedings*, Vancouver, BC, 2006, doi: 10.1109/IJCNN.2006.247109
- [72] J. Warne, *The Practical Impacts of RTD and Thermometer Design on Wet and Dry Bulb Relative Humidity Measurements*. Bureau of Meteorology, Melbourne (1998)
- [73] Wexler A. and S. Hasegawa, 1954: Relative Humidity- Temperature Relationships of Some Saturated Salt Solutions in the Temperature Range 0C to 50C. *J.Res. Nat. Bur. Standards*, Vol. 53, 19, RP 2512.
- [74] Willits, Pat, ed. (2004), *Guided Flight Discovery - Private Pilot*. Abbot, Mike Kailey, Liz. Jeppesen Sanderson. pp. 2–48–2–53. ISBN 0-88487-333-1.
- [75] L. Xu, X. Zhao, X. Pang, A. Stein and Q. Ji, "Sensitivity analysis of the long-term trend in Antarctic sea ice extent," 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Beijing, 2016, doi: 10.1109/IGARSS.2016.7730270
- [76] Z. XU, P. Johansen and Z. FU, "Test and Analysis of Lightning Sensor Based on Lightning Magnetic Field Using a Scale Model," *2019 11th Asia-Pacific International Conference on Lightning (APL)*, Hong Kong, 2019, doi: 10.1109/APL.2019.8815952
- [77] R. Yordanov, R. Miletiev and E. Iontchev, "Measurement of atmospheric pollutants based on electrochemical sensors and digital signal processing," *2019 IEEE XXVIII International Scientific Conference Electronics (ET)*, Sozopol, Bulgaria, 2019, doi: 10.1109/ET.2019.8878616
- [78] A. Zalizovski, B. Dziak-Jankowska, I. Stanislawska and Y. Yampolski, "Connection between sporadic E layers and geomagnetic field variations at the Antarctic Peninsula and Europe," *2019 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC)*, New Delhi, India, 2019, doi: 10.23919/URSIAP-RASC.2019.8738614
- [79] H. Zhang, Y. Liang, Q. Zhou, H. Fan and J. Dai, "A self-adaptive greenhouse CO2 concentration monitoring system based on ZigBee," *2012 IEEE 2nd International Conference on Cloud Computing and Intelligence Systems*, Hangzhou, 2012, doi: 10.1109/CCIS.2012.6664560
- [80] J. Zhang, Z. Wu, Z. Zhao and X. Guan, "Miniature pyranometer with asteroid shape thermopile," 2012 7th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS), Kyoto, 2012, doi: 10.1109/NEMS.2012.6196734
- [81] C. Michael Hogan. 2010. Abiotic factor. *Encyclopedia of Earth*. eds Emily Monosson and C. Cleveland. National Council for Science and the Environment, Washington DC
- [82] Lawrence, Tony (1992). "Serial Wiring". A. P. Lawrence. 1992.
- [83] Jones H. (July 2007). "EU bans mercury in barometers, thermometers".

- [84] IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse gas fluxes in Terrestrial Ecosystems, 2019
- [85] Paris Agreement, United Nations Treaty Collection. 8 July 2016
- [86] Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation - WMO-No. 8 - edition 2014, updated 2017, ISBN 978-92-63-10008-5
- [87] International Bureau of Weights and Measures (2006), The International System of Units (SI) (8th ed.), ISBN 92-822-2213-6
- [88] Revision of IEC 60584-1:2013
- [89] Revision of ISO 80000-4:2019
- [90] International Organization for Standardization, Standard Atmosphere, ISO 2533:1975
- [91] Thermal Management Handbook, Maxim Integrated, 2014
- [92] Temperature Handbook, Labfacility LTD. 2006
- [93] MEMS Barometric Pressure Sensor, Sensors & Transducers E-Digest. **92** (4). 2008
- [94] Instrumentation: Pitot Tube Static Anemometer, 2009, Mt. Washington Observatory,
- [95] Hot-wire Anemometer explanation. eFunda, 2006.
- [96] Precipitation, Glossary of Meteorology. American Meteorological Society. 2009
- [97] National Aeronautics and Space Administration (2012). "NASA and JAXA's GPM Mission Takes Rain Measurements Global".
- [98] How Far and How Fast Can You Go with RS-485? - Application Note - Maxim.
- [99] BMP180 Digital pressure sensor, Bosch Sensortec, BST-BMP180-DS000-12, 2015
- [100] TMP112 High-Accuracy, Low-Power, Digital Temperature Sensor, Texas Instruments, SLOS887, 2015
- [101] HDC1080 Low Power, High Accuracy Digital Humidity Sensor with Temperature Sensor, Texas Instruments, SNAS672A, 2015
- [102] ADS7828 12-Bit, 8-Channel Sampling ANALOG-TO-DIGITAL CONVERTER with I2C™ Interface, Texas Instruments, SBAS181C, 2005
- [103] INA827 Wide Supply Range, Rail-to-Rail Output Instrumentation Amplifier with a Minimum Gain of 5, Texas Instruments, SBOS631A, 2013