



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

MONITOROVÁNÍ OVZDUŠÍ

CONTROL SYSTEM FOR AIR MONITORING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Karel Chlumecký

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.

BRNO 2022

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Mikroelektronika**

Ústav mikroelektroniky

Student: Bc. Karel Chlumecký

ID: 203236

Ročník: 2

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Monitorování ovzduší

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V rámci diplomové práce navrhnete a realizujete koncept zařízení pro monitorování ovzduší v domácnosti. V rámci práce vyberte vhodný mikrokontrolér dle požadovaných hardwarových vlastností, proveďte srovnání vhodné bezdrátové technologie, vybranou technologii implementujte do zařízení. Zařízení navrhnete s ohledem na možné vzdálené ovládání. Ověřte funkčnost navrženého zařízení.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 24.5.2022

Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.

doc. Ing. Lukáš Fajcik, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Diplomová práce se zaměřuje na vývoj zařízení pro domácnost, které umožní uživateli nejen měřit kvalitu a vlastnosti ovzduší v jednotlivých místnostech, ale také umožní grafické zobrazení naměřených hodnot pomocí bezdrátového přenosu. Práce se nejprve zabývá výběrem vhodného mikrokontroléru a poté jsou stručně popsány bezdrátové komunikace a použité periférie. Následně jsou rozebrány principy měření jednotlivých nefyzikálních veličin. Dále se práce zabývá návrhem samotného zařízení, jeho hardwarovou i softwarovou výbavou a také jeho konstrukcí. V rámci práce jsou rozebrány i finanční náklady. Součástí práce je i závěrečné otestování zkompletovaného zařízení pro měření ve dvou místnostech obytného domu.

Klíčová slova

Mikrokontrolér, ESP32, bezdrátová komunikace, měření teploty a vlhkosti, konstrukce zařízení

Abstract

The master's thesis focuses on the development of household device which allows the user not only to measure quality and properties of air in individual rooms but also allows graphical display of measured values via wireless transmission. The work first deals with selection of a suitable microcontroller and then the wireless communications and used peripherals are briefly described. Furthermore, the work deals with the design of the device itself, its hardware and software equipment, as well as its construction. The financial costs are also analyzed in this work. Part of the work is the final testing of the completed equipment for measuring in two rooms of a residential house.

Keywords

Microcontroller, ESP32, wireless communication, measurement of temperature and humidity, equipment design

Bibliografická citace

CHLUMECKÝ, Karel. *Monitorování ovzduší*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky, 2022. 73 s., 7 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Šteffan Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	<i>Karel Chlumecký</i>
VUT ID studenta:	203236
Typ práce:	<i>Diplomová práce</i>
Akademický rok:	2021/22
Téma závěrečné práce:	<i>Monitorování ovzduší</i>

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 23. května 2022

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Pavlu Šteffanovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

Také děkuji firmě Espressif systems a jeho zastupiteli Juraji Michálkovi za poskytnutí mikrokontrolérů a cennou komunikaci.

V Brně dne: 23. května 2022

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	9
SEZNAM TABULEK.....	10
ÚVOD	11
1. TEORETICKÝ ROZBOR.....	12
1.1 MIKROKONTROLÉR	12
1.2 VYBRANÝ MIKROKONTROLÉR.....	13
1.2.1 Vznik ESP32.....	13
1.2.2 Vlastnosti mikroprocesorů od firmy Espressif systems	14
1.3 PERIFERIE MIKROKONTROLÉRU.....	15
1.3.1 Paměti	15
1.3.2 Řadič přerušení.....	17
1.3.3 Časovače	17
1.4 REŽIMY PRO SNÍŽENOU SPOTŘEBU ENERGIE	17
1.5 BEZDRÁTOVÁ KOMUNIKACE	19
1.5.1 Wi-Fi, HaLow	19
1.5.2 Bluetooth.....	22
1.6 NÁVRH WEBOVÉHO ROZHRAŇÍ	24
1.6.1 HTML.....	24
1.6.2 CSS.....	25
1.6.3 Java Script	25
1.7 CLOUDOVÉ SLUŽBY.....	26
1.7.1 ThingSpeak.....	26
1.8 POUŽITÉ SBĚRNICE	27
1.8.1 Sběrnice I2C.....	27
1.8.2 UART	29
1.9 VÝBĚR RTC-OBVODU.....	30
1.9.1 BQ32002D	31
1.9.2 DS3231mz	31
1.9.3 Vybrání vhodného obvodu	32
2. MĚŘENÍ NEELEKTRICKÝCH VELIČIN	33
2.1 MĚŘENÍ TEPLoty	33
2.1.1 Odporové kovové senzory	33
2.1.2 Termočlánky.....	34
2.1.3 Odporové polovodičové senzory	34
2.2 MĚŘENÍ VLHKOSTI	35
2.2.1 Kapacitní senzor vlhkosti	35
2.2.2 Odporový senzor vlhkosti.....	36
2.2.3 Nepřímá metoda měření vlhkosti	37
2.3 MĚŘENÍ TLAKU	37
2.3.1 Kapacitní měření.....	37
2.3.2 Tenzometr.....	37
2.3.3 Piezoelektrický senzor.....	38

2.4	MĚŘENÍ OSVĚTLENÍ.....	38
2.4.1	<i>Fotorezistor.....</i>	38
2.4.2	<i>Fotodioda.....</i>	38
2.4.3	<i>Fototranzistor.....</i>	39
2.5	MĚŘENÍ PEVNÝCH ČÁSTIC VZDUCHU.....	39
3.	NÁVRH SYSTÉMU.....	41
3.1	BLOKOVÉ SCHÉMA.....	41
3.2	POUŽITÉ SENZORY A DALŠÍ HARDWARE.....	41
3.2.1	<i>Senzor pro měření teploty a vlhkosti – HTU21D.....</i>	42
3.2.2	<i>Senzor osvětlení – BH1750.....</i>	42
3.2.3	<i>Senzor tlaku – BMP180.....</i>	43
3.2.4	<i>Senzor pevných částic – PM1006.....</i>	43
3.3	NÁVRH BATERIE PRO RTC OBVOD.....	46
3.4	NÁVRH NAPÁJENÍ PRO MODULY.....	46
3.5	ZHOTOVENÍ ZAŘÍZENÍ.....	48
3.6	FINANČNÍ ROZVAHA ZAŘÍZENÍ.....	50
4.	POPIS PROGRAMOVÉ FUNKCE.....	52
4.1	PROGRAM ESP32 – HLAVNÍ MODUL.....	52
4.1.1	<i>Připojení jako přístupový bod.....</i>	54
4.1.2	<i>Připojení jako zařízení.....</i>	55
4.1.3	<i>Vytvoření komunikace mezi moduly s Bluetooth Low Energy.....</i>	57
4.2	PROGRAM ESP32 – VEDLEJŠÍ MODUL.....	58
5.	VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT.....	60
5.1	TEPLOTA.....	60
5.2	VLHKOST.....	62
5.3	TLAK.....	64
5.4	OSVĚTLENÍ.....	66
5.5	PEVNÉ ČÁSTICE.....	67
6.	ZÁVĚR.....	69
	LITERATURA.....	70
	SEZNAM PŘÍLOH.....	74

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1-1 - Vybrané mikroprocesory (zleva nRF52840, ESP32, CC3235MOD) [4] [5] [6].....	13
Obrázek 1-2 - Vybraný modul ESP32-WROVER-E	15
Obrázek 1-3 – Rozdíl mezi typem paměti NOR a NAND FLASH [11].....	16
Obrázek 1-4 - Blokové schéma mikrokontroléru ESP32[47]	18
Obrázek 1-5 - Princip připojení k Wi-Fi [14]	21
Obrázek 1-6 - Rozdělení TCP/IP na vrstvy [16].....	21
Obrázek 1-7 - Bluetooth propojení více pikosítí [19]	23
Obrázek 1-8 – Bluetooth komunikační paket [21]	23
Obrázek 1-9 - Bluetooth low energy komunikační paket [22].....	24
Obrázek 1-10 - Příklad založení uložiště hodnot	27
Obrázek 1-11 - vliv RC článku na ostrost hran [23]	28
Obrázek 1-12 - princip I2C komunikace [24]	29
Obrázek 1-13 - Princip UART komunikace [46]	30
Obrázek 1-14 - Blokové schéma RTC IO BQ32002D [42]	31
Obrázek 1-15 - Blokové schéma RTC IO DS3231mz [43]	32
Obrázek 2-1 - Pt100 a Pt1000 [28]	34
Obrázek 2-2 - Termočlánek typu K [29].....	34
Obrázek 2-3 - Charakteristika diody pro různé teploty [30]	35
Obrázek 2-4 - Kapacitní senzor vlhkosti [32]	36
Obrázek 2-5 - Odporový senzor vlhkosti [33]	36
Obrázek 2-6 - Foliový tenzometr [40]	38
Obrázek 2-7 - Průměrná koncentrace pevných částic v ČR [41]	40
Obrázek 3-1 - Blokové schéma zapojení	41
Obrázek 3-2 - Senzor HTU21D [35].....	42
Obrázek 3-3 - Senzor BH1750 [37]	43
Obrázek 3-4 - Senzor BMP180 [39]	43
Obrázek 3-5 - VINDRIKTING – ovládací prvek + senzor PM1006 [44].....	45
Obrázek 3-6 - Zapojení ventilátoru na DPS.....	45
Obrázek 3-7 – Vyrobené desky plošných spojů pro hlavní i vedlejší modul.....	48
Obrázek 3-8 - Zkompletovaný hlavní modul	49
Obrázek 3-9 - Zkompletovaný vedlejší modul.....	50
Obrázek 4-1 - Vývojový diagram hlavního modulu	53
Obrázek 4-2 - Access Point webová stránka pro přihlášení	54
Obrázek 4-3 - Webová stránka pro měření veličin	56
Obrázek 4-4 - Struktura GATT [48]	58
Obrázek 4-5 - Vývojový diagram programu vedlejšího modulu	59
Obrázek 5-1 - Teplota naměřená hlavním modulem.....	61
Obrázek 5-2 - Teplota naměřená vedlejším modulem	61
Obrázek 5-3 - Vlhkost naměřená hlavním modulem	63
Obrázek 5-4 - Vlhkost měřená vedlejším modulem	63
Obrázek 5-5 - Tlak naměřený hlavním modulem s přepočtem k hladině moře	65
Obrázek 5-6 - Tlak naměřený vedlejším modulem s přepočtem k hladině moře.....	65
Obrázek 5-7 - Osvětlení naměřený hlavním modulem	66
Obrázek 5-8 - Osvětlení naměřený vedlejším modulem.....	67
Obrázek 5-9 - Pevné částice naměřené hlavním modulem	68

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - Porovnání hodnot možných mikrokontrolérů [1] [2] [3]	12
Tabulka 2 - vlastnosti mikroprocesoru ESP8266 [7]	13
Tabulka 3 - srovnání parametrů mikroprocesorů od firmy Espressif systems [8]	14
Tabulka 4 - Přehled norem 802.11x [12]	19
Tabulka 5 - Výkonové třídy komunikace Bluetooth.....	22
Tabulka 6- Náklady na výrobu hlavního modulu	50
Tabulka 7- Náklady na výrobu vedlejšího modulu	51

ÚVOD

Model chytré domácnosti se dostává stále více do povědomí veřejnosti. Chytrá domácnost pro svůj správný chod potřebuje mít informace z každé části domácnosti. Z tohoto důvodu je nutné sestavit kompletní systém pro monitorování těchto informací. Následně je možné s nimi ovládat veškerá zařízení připojená pro kontrolu domácnosti. Takovými zařízeními jsou kotle, řízená okna, osvětlení, chytré dveře atd.

První částí práce je teoretický rozbor, který se nejprve zaměřuje na výběr mikrokontroléru pro konstruované zařízení. Po zhodnocení parametrů vybraných mikrokontrolérů bylo vybráno zařízení ESP32, jehož parametry a vlastnosti byli řešeny v druhé části teoretického rozboru. Dále jsou rozebrány možnosti bezdrátových komunikací se zaměřením na Wi-Fi a Bluetooth Low Energy. Následuje část, která se zabývá programováním webového rozhraní a zobrazením dat na vzdálených úložištích. V poslední části teoretického rozboru jsou rozebrány použité sběrnice a zvolený RTC modul, který bude sloužit k určování času konstruovaného zařízení.

Druhá část práce pojednává o neelektrických veličinách měřených pomocí navrhovaného zařízení. Jedná se o teplotu, vlhkost, osvětlení, tlak a znečištění pevnými částicemi.

V třetí části práce je řešen konečný koncept zařízení. Nejprve je představeno blokové schéma a také princip funkce zařízení. Poté jsou rozebrány použité senzory a hardware pro jejich správnou funkci. Součástí je i návrh napájení modulů a RTC obvodu, kde jsou v případě baterií uvedeny i výpočty jejich životností. V další části jsou technické informace o výrobě desek plošných spojů a následná konstrukce ochranného krytu zařízení. V závěru je řešena finanční stránka vyrobených zařízení.

Čtvrtá část práce se zabývá vývojem programu a webových stránek. Také je zde řešena komunikace mezi jednotlivými moduly, které měří v rozdílných místnostech. Programové funkce jsou rozebrány jak pro hlavní modul, tak i vedlejší.

Poslední část práce shrnuje získané výsledky měření v podobě grafů, které jsou posléze vyhodnoceny s ohledem na možná zdravotní rizika pro obyvatele objektu, ve kterém probíhalo měření.

1. TEORETICKÝ ROZBOR

Práce se zabývá konstrukcí zařízení pro domácí monitorování kvality ovzduší ve více místnostech. Informace získané měřením budou vypisovány na webovou stránku, díky které bude uživateli umožněno sledování naměřených hodnot i mimo jeho domov. Za tímto účelem je důležité si zvolit si vybrat mikrokontrolér, který by splnil požadavky na hardware, podporu bezdrátových komunikací i softwarovou podporu.

1.1 Mikrokontrolér

Mikrokontroléry jsou sekvenční univerzální mikropočítače, navržené pro vytváření aplikací. Hlavním důvodem pro použití právě mikrokontrolérů je především jejich snadná re programovatelnost, díky čemuž se nemusí kvůli malé změně předělávat celý návrh. První mikrokontrolér vznikl v roce 1971 za účelem zjednodušení obtížného návrhu kalkulačky. Tento mikrokontrolér je známý jako Intel 4004. Od té doby začalo vznikat mnoho dalších mikroprocesorů, které řídí v podstatě veškeré sofistikovanější elektronické spotřebiče.

Při výběru mikrokontroléru je důležité určit si požadavky podle náročnosti aplikace. Při práci s webovým rozhraním patří mezi velice důležité parametry vysoká rychlost velká paměť a druh integrované bezdrátové komunikace. Dále je důležitá podpora drátových komunikací, dobrá softwarová podpora, co nejnížší možná cena a aby byly všechny funkce integrované do jednoho pouzdra. Těmto požadavkům odpovídá celá škála mikrokontrolérů, a proto je důležité provést detailní srovnání jednotlivých zařízení. Vybrané mikrokontroléry nRF52840 od firmy Nordic Semiconductors, ESP32 od firmy Espressif systems a CC3235MODASF od firmy Texas Instruments jsou srovnány v tabulce 1 a jejich fyzická podoba je znázorněna na obrázku 1-1.

Tabulka 1 - Porovnání hodnot možných mikrokontrolérů [1] [2] [3]

Vlastnost	nRF52840	ESP32	CC3235MODASF
Jádro procesoru	Arm Cortex M4F	Xtensa LX6 single/ dual core	Arm®Cortex®-M4
Frekvence [MHz]	64	240	80
Napětí [V]	3,3	3,3	3,3
Procesor [bity]	32	32	32
I/O piny	22	34	26
Flash paměť [MB]	1	4/8	1
RAM paměť [kB]	256	520	256
Wi-Fi	Ne	Ano	Ano
Bluetooth	Ano	Ano	Ne
Cena [\$]	31,10	5	9,5



Obrázek 1-1 - Vybrané mikroprocesory (zleva nRF52840, ESP32, CC3235MOD)
[4] [5] [6]

1.2 Vybraný mikrokontrolér

Vzhledem k požadavku na současné použití Wi-Fi a Bluetooth je preferováno ESP32, které má obě možnosti v sobě již integrované. Ostatní mikroprocesory v sobě nemají zabudován některý z požadovaných druhů komunikace, a proto by se jejich nepřítomnost musela řešit přidáním podpůrných modulů. ESP32 má velkou převahu v oblasti ostatních parametrů, kterými je například rychlost a paměť, a proto byl právě tento mikroprocesor zvolen pro vytvoření projektu.

1.2.1 Vznik ESP32

Prvním mikrokontrolérem firmy Espressif systems byl ESP8266. Tento mikroprocesor měl původně sloužit jako Wi-Fi modul (ESP-01). Komunita lidí ho však začala programovat a následně se modul dal využít jako mikrokontrolér. Nevýhodou bylo, že neměl mnoho vstupně/výstupních pinů či paměti, a tak se používal jen pro malé aplikace. Firma následně začala pracovat na novém a výkonnějším jádru fungujícím na podobném principu jako původní Wi-Fi modul.

Tabulka 2 - vlastnosti mikroprocesoru ESP8266 [7]

Vlastnosti	Hodnota
Počet vstupně/výstupních pinů	2 + TX/RX piny
Instrukční paměť	64 kB
Datová paměť	96 kB
Flash paměť	<1 MB
Frekvence oscilátoru	80, 160 MHz

1.2.2 Vlastnosti mikroprocesorů od firmy Espressif systems

Tento mikrokontrolér se stal velkým hitem převážně v asijských zemích, a to již od dob svého vydání v roce 2016. Svoji popularitu staví na zabudovaných bezdrátových komunikacích, velkém výkonu a snadné manipulovatelnosti. Od dob prvního vydání vzniklo mnoho produktů navazujících na mikroprocesory ESP32. Díky tomu vzniklo mnoho různých druhů mikrokontrolérů od firmy Espressif systems, které jsou vyhovující pro použití v této diplomové práci. Jednotlivé možnosti byly rozebrány v tabulce 3.

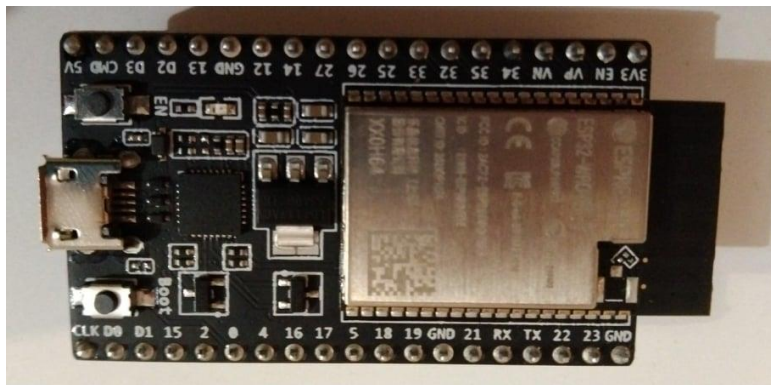
Tabulka 3 - srovnání parametrů mikroprocesorů od firmy Espressif systems [8]

Mikroprocesor	ESP32	ESP32-S2	ESP32-C3	ESP32-S3	ESP32-H2
Jádro	Xtensa LX6 single/ dual core	Xtensa LX7 single core	RISC-V single core	Xtensa LX7 dual core	RISC-V single core
Frekvence	240 MHz	240 MHz	160 MHz	240 MHz	96 MHz
Procesor	32 bitů	32 bitů	32 bitů	32 bitů	32 bitů
SRAM paměť	520 kB	320 kB	400 kB	512 kB	400 kB
ROM paměť	448 kB	128 kB	384 kB	384 kB	384 kB
Bezdrátová komunikace	Wi-Fi, Bluetooth + Bluetooth Low Energy	Wi-Fi	Wi-Fi, Bluetooth Low Energy	Wi-Fi, Bluetooth Low Energy	Bluetooth Low Energy, Zigbee
I/O piny	34	43	22	45	26
I/O periférie	ADC, DAC, SPI, I2C, I2S, UART, PWM, TWAI, ETHERNET	USB, ADC, DAC, SPI, I2C, I2S, UART, PWM, TWAI	ADC, SPI, I2C, I2S, UART, PWM, TWAI, USB, JTAG	USB, ADC, DAC, SPI, I2C, I2S, UART, PWM, TWAI	ADC, SPI, I2C, I2S, UART, PWM, USB, JTAG

Hlavním požadavkem byla možnost komunikace pomocí Wi-Fi, kvůli čemu bylo ESP32-H2 z výběru vyřazeno. Také ESP32-C3 obsahující Wi-Fi i Bluetooth nebyl vhodným kandidátem. Z důvodu obsluhy webových serverů je důležité, aby měl mikroprocesor dostačující výkon a paměti. Pro realizaci zadání je možné použít i ostatní procesory z řady ESP32-Sx, ale ty obsahují zbytečně velký počet I/O pinů, které by nebyly využity, a to by pouze zvýšilo cenu zařízení bez jeho vylepšení. Mikroprocesor ESP32 bylo vyhodnoceno jako nejlepší volba pro použití v této práci kvůli velkým pamětem, optimálnímu množství pinů a velkému výkonu.

Základní modul ESP32 se využívá v mnoha různých seriích již hotových mikrokontrolérů jako léty ověřený modul. Moduly wroom se od základního liší především v paměti Flash a jiných menších úpravách vytvořených na vývojovém

modulu. Z celé série byl vybrán vývojový modul ESP32–WROVER-E. Tento modul má velmi velkou paměť flash o velikosti 4 MB podpořenou 8 MB pamětí typu PSRAM.



Obrázek 1-2 - Vybraný modul ESP32-WROVER-E

1.3 Periferie mikrokontroléru

Periférii je označováno veškeré hardwarové vybavení mimo jádro. Tyto periférie napomáhají správnému chodu programu. Každý mikrokontrolér má své periférie, které se mohou od sebe lišit na základě návrhu či požadavků. U ESP32 existují kromě standartních periférií i integrované RTC obvody (Real Time Clock) nebo teploměr atd.

1.3.1 Paměti

Paměti se dnes vyskytují v téměř každém elektronickém zařízení. Jedná se pouze o komponentu, která je schopná uchovávat informaci v podobě logické 1 či 0. U pamětí se řeší celá řada parametrů jako je velikost, rychlost, úspornost a volatilita (schopnost udržet informaci i po odpojení od energie). Pamětí je dnes mnoho druhů, z tohoto důvodu budou v této práci rozebrány pouze využívané paměti v rámci zvoleného modulu.

Prvním typem pamětí je ROM – Read Only Memory. Tato paměť slouží pouze ke čtení. Informace jsou nahrány do paměti při výrobě čipu a data již nejdou změnit. Logická 1 je prezentována fyzickým propojením a logická 0 naopak rozpojením. Díky fyzické podstatě informace je paměť udržena i po odpojení od napájecího zdroje. Tato paměť je určena především pro důležité informace, které se nebudou v mikrokontroléru měnit. ESP32 tuto paměť využívá pro bootovací systém a základní funkce jádra. Velikost této paměti u použitého modulu je 448 kB. [8] [10]

Dalším významným typem pamětí je RWM – Read Write Memory. Její nejznámější zástupce je RAM (Random Access Memory). U této paměti se může přistupovat k libovolné buňce a zapisovat do ní nebo z ní číst. Tato paměť má více principů zapojení jako je SRAM (Static RAM), DRAM (Dynamic RAM), PSRAM (Pseudo Static RAM) či FLASH.

Paměť SRAM je volatilní, ale nepotřebuje svou informaci obnovovat během napájení. Paměti SRAM bývají velmi rychlé, mají nedestruktivní čtení, ale kvůli tomu, že jedna buňka obsahuje 4-6 tranzistorů jsou i velmi drahé a zabírají mnoho místa na

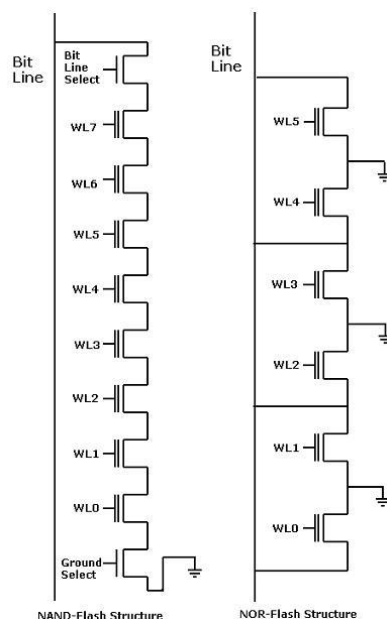
čipu. Tato paměť slouží na práci s daty a pro vykonávání instrukcí. Ve zvoleném mikrokontroléru má tato paměť velikost 520 kB.

DRAM je paměť tvořena kondenzátorem a tranzistorem. Čtení je destruktivní, protože při vybití kondenzátoru se ztratí uložená hodnota. Hodnota na kondenzátoru musí být během provozu neustále obnovována, aby se předešlo její ztrátě. Výhodou je jednoduchost a malé místo na čipu, které zabírá. Tato paměť není obsažena v čipech ESP32, ale její princip pomáhá tvořit paměť PSRAM.

Paměť PSRAM je kombinací SRAM a DRAM, kde je jádro buňky tvořené na základě DRAM a je připojen na sběrnice principem jako SRAM. Pro jednu buňku je potřeba méně místa na čipu a zároveň nepotřebuje obnovovat svou informaci během provozu. V mikrokontroléru použitým v této práci se PSRAM využívá jako pomocná paměť pro flash paměť, pokud je požadováno uchování většího objemu dat. Na využitém mikrokontroléru má tato paměť velikost 8 MB. [9] [10]

Posledním typem je flash paměť. Principem této paměti je tranzistor s plovoucím hradlem na vývodu hradla gate. Plovoucí hradlo je izolované oxidem, a to zajistí, že při určité koncentraci náboje v něm je na hradle gate naměřená hodnota napětí, a to určuje logickou 1. Paměť typu flash má možnost zapisovat data po blocích a čtení záleží na typu zapojení tranzistorů. Zapojení jsou typu NOR a NAND. Zapojení NOR umožňuje čtení jedné paměťové buňky, zatímco uspořádání NAND dokáže číst pouze celý blok. Oproti zapojení NOR má NAND zapojení větší hustotu dat a rychlejší čtení.

V dnešní době je technologie výroby flash pamětí natolik rozvinutá, že jeden tranzistor neuchovává pouze jeden bit, ale může jich uchovávat více. Tato technologie se nazývá multi level cell. V buňce jsou vymezeny mezistavy, které pokryjí daný bitový zápis a tato hodnota je potom převáděna. Nevýhodou flash pamětí je jejich větší chybovost a větší výstupní logika oproti klasické single level cell flash paměti. [9] [10]



Obrázek 1-3 – Rozdíl mezi typem paměti NOR a NAND FLASH [11]

1.3.2 Řadič přerušení

Jedná se o důležitou součást jednočipového počítače. Tento řadič zpracovává přerušení (angl. Interrupts) a při příchodu signálu program přeskočí na obslužný program. Přerušení jsou obecně asynchronní akce vyvolané vnitřní strukturou mikrokontroléru (doběhnutí časovače, dokončení A/D převodu atd.) či vnějším podnětem, kdy se nejčastěji jedná o uživatelem či modulem vyvolané akce (stisk tlačítka, senzor hladiny atd.).

Jak je uvedeno výše druhů přerušení je celá řada a při příchodu dvou a více přerušení je program nucen tyto přerušení vyhodnotit podle prioritní tabulky a poté je v daném pořadí vykonat.

1.3.3 Časovače

Časovače fungují jako spojka mezi mikrokontrolérem a časem. V časovači použitém v této práci velmi záleží na jeho taktování, protože využití časové prodlevy či odpočty mohou být pouze v násobcích taktovací frekvence (využití předděličky pro změnu taktovací frekvence). Principem funkce je neustálé porovnávání stále se inkrementujícího registru s registrem, který předvyplnil programátor. Po shodě obou registrů je odesláno přerušení. [9]

U zvoleného mikroprocesoru jsou dva časovače. Předdělička je 16bitová a umožňuje tak dělit taktovací frekvenci v rozmezí od 2 do 65 536. Registr je možný nastavit na inkrementaci i dekrementaci. Je navíc hlídán i watchdogem, který v případě zaseknutí vykoná předem nastavenou funkci (přerušení, CPU reset, core reset či systémový reset).

1.4 Režimy pro sníženou spotřebu energie

Režimy pro nízkou spotřebu jsou pro mikrokontroléry důležité převážně při baterií napájených aplikacích. Při usnutí jednotlivých bloků mikrokontrolérů lze snížit spotřebu energie, a tím pádem zvýšit čas funkčnosti zařízení bez následného nabíjení nebo výměny baterie, protože usnutí znamená odpojení určité části od napájení. Zvolený mikrokontrolér ESP32 má více typů režimů pro sníženou spotřebu energie, které umožňují uspat různě velkou oblast mikrokontroléru. Veškeré periférie jsou znázorněné na obrázku 1-4.



Obrázek 1-4 - Blokové schéma mikrokontroléru ESP32[47]

ESP32 umožňuje práci v pěti režimech. První režim se nazývá aktivní režim, který z výše znázorněných bloků neuspává ani jeden. Tento režim se využívá při komunikaci mikrokontroléru přes bezdrátové technologie. Režim má vysoký odběr proudu okolo 250 mA, který může být doprovázen mnoha nárazovými špičkami dosahující hodnot až 700 mA.

Pokud požadujeme menší odběr proudu, můžeme využít režim modem sleep, který zaručuje odpojení veškerých bezdrátových komunikací jako je Wi-Fi, Bluetooth a rádio. Také jsou odpojeny všechny vstupně/výstupní piny. Tento režim umožňuje připojit odpojené periférie po různých intervalech a střídát režimy mezi modem sleep a aktivním režimem. Nevýhoda tohoto nastavení spočívá v nemožnosti nastavit uspávaný mikrokontrolér jako přístupový bod či provozovat serverové funkce. Proudový odběr tohoto režimu je mezi 3–20 mA.

Pro ještě menší proudový odběr lze použít režim light sleep, který má odběr menší než 1 mA. K největší spotřebě energie v režimu modem sleep dochází při dynamickém odběru proudu, který je způsoben změnou stavů paměti. Tento jev je v režimu light sleep eliminován deaktivováním většiny RAM paměti a jádra mikrokontroléru. Paměť flash je zde funkční, což znamená, že po aktivaci čipu lze pokračovat v programu z místa, kde byl mikrokontrolér uveden do režimu light sleep. Jádro ESP32 nereaguje na vnější podněty a je ve stavu vyčkávání na aktivaci nastavenou událostí. Touto událostí může být přerušení na vstupně/výstupním pinu či uběhnutí nastavené doby v integrovaném RTC obvodu (časovači).

Menšího proudového odběru lze docílit uvedením mikrokontroléru ESP32 do režimu, který se nazývá deep sleep, jehož odběr je pouze 10 μA až 150 μA . Režim je podobný předchozímu režimu, ale s tím rozdílem, že je navíc odpojena i flash paměť. Z tohoto důvodu je čip po aktivaci v módu bootování a znovu načítání programu.

Veškerá data jsou poté ztracena, jestliže nebyly zálohovány ve flash paměti. Ke zpětné aktivaci mikrokontroléru může dojít vstupně/výstupním pinem či uběhnutím doby v integrovaném časovači. Může zde být využit i ULP co-processor, který provede aktivaci mikrokontroléru po dosažení určité hodnoty na jeho pinu.

Nejmenší možný proudový odběr ze všech možných režimů mikrokontroléru ESP32 má režim hibernace, ve kterém se odběr pohybuje kolem 2,5 μA . V tomto režimu je odpojen i ULP co-processor, což znamená, že jedinou možností aktivace mikrokontroléru je použití integrovaného časovače. [47]

1.5 Bezdrátová komunikace

Do bezdrátové komunikace řadíme všechny komunikace, které mezi sebou nekomunikují pomocí kabelu. V dnešní době existuje více typů bezdrátové komunikace, ale v této práci se bude využívat pouze Wi-Fi a Bluetooth.

1.5.1 Wi-Fi, HaLow

Tato bezdrátová komunikace vznikla v roce 1997 jako standard pro lokální bezdrátové sítě (WLAN). V dnešní době se převážně využívá pro připojení do sítě internetu. Hlavní myšlenkou je komunikace mezi koncovými uzly a přístupovým bodem (angl. Access point).

Tato komunikace vychází ze specifikace IEEE 802.11, která za své fungování vydala již mnoho norem (standardů), upravující rychlosti, metody přenosu či používané frekvenční pásmo. Kvůli matoucím označením standardů vydalo sdružení Wi-Fi Alliance zjednodušené pojmenování pro průlomové standardy ve formátu Wi-Fi X, kde X označuje konkrétní verzi standardu. Sdružení zajišťuje i zpětnou kompatibilitu nových standardů se staršími verzemi. Stručný přehled standardů je uveden v tabulce 4.

Tabulka 4 - Přehled norem 802.11x [12]

Standard	Označení	Rok vydání	Pásmo [GHz]	Max. rychlost [Mbit/s]	Metody přenosu
IEEE 802.11	-	1997	2,4	2	DSSS, FHSS
IEEE 802.11 a	Wi-Fi 1	1999	5	54	OFDM
IEEE 802.11 b	Wi-Fi 2	1999	2,4	11	DSSS
IEEE 802.11 g	Wi-Fi 3	2003	2,4	54	OFDM
IEEE 802.11 n	Wi-Fi 4	2009	2,4/5	600	MIMO OFDM
IEEE 802.11 ac	Wi-Fi 5	2013	5	1024	MU-MIMO OFDM
IEEE 802.11 ax	Wi-Fi 6	2019	2,4/5/6	10530	MU-MIMO OFDMA
IEEE 802.11 ah	HaLow	2021	0,868	0,15 - 80	OFDM

První internetový standard obsahuje veškeré principy, které má internet i dnes, ale s vylepšením metody přenosu. Důležité je si zde definovat DCF (Distributed Coordination Function), která je na všech zařízeních Wi-Fi. Funguje na principu CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/ Collision Avoidance). Jedná se o techniku přístupu, kde zařízení po náhodných intervalech přistupuje k médiu a zjišťuje jeho stav. Pokud je zařízení volné, posílá data. Kvůli připojení více zařízení přes přístupový bod je důležité pojistit tuto komunikaci „svolením“. To probíhá tak, že zařízení pošle při zjištění volného média RTS paket (Request To Send) a následně čeká na CTS (Clear To Send) paket. Tento systém neumožňuje nastavení priorit a jeho rychlost rapidně klesá. První internetový standard využívá modulaci FHSS a DSSS. [13]

Standard IEEE 802.11 a – Využívá 5 GHz pásmo. Výrazně stabilnější i rychlejší na delší vzdálenost. Modulace OFDM

Standard IEEE 802.11 b – Rozšíření základního standardu. Dosaženo vyšší rychlosti. Modulace DSSS.

Standard IEEE 802.11 g – Rozšíření pro standard b. Změna modulace na OFDM. Zvýšená rychlost a zajištěná zpětná kompatibilita.

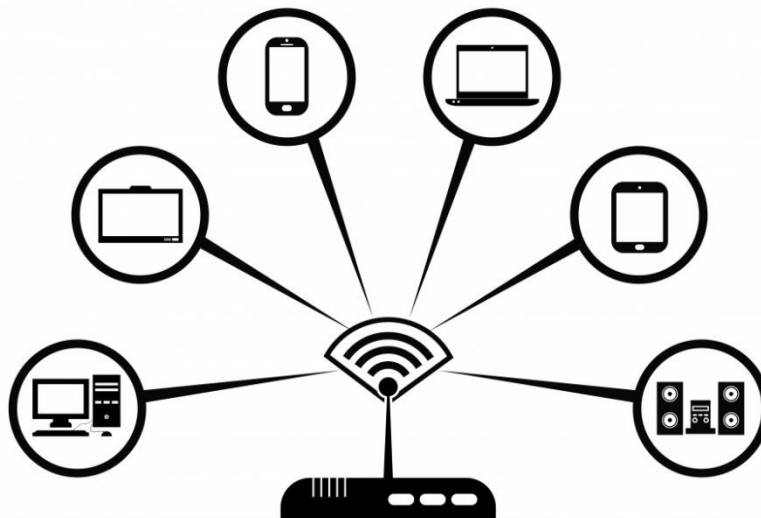
Standard IEEE 802.11 n – Využívané i použitým mikrokontrolérem. Upravuje komunikaci na úrovni podvrstvy MAC, kde informace, které jsou stejné, vloží před první fragment. Dojde ke zvýšení rychlosti. Podporuje obě vysílací pásma 2,4 GHz (tato hodnota je pouze teoretická, ve skutečnosti se jedná o $\pm 2,4$ -2,5 GHz) a 5GHz. Využívá principu MIMO (Multiple input, Multiple output), který zvýší množství antén a také paralelnost zpracování informací, ale pouze pro jednoho uživatele.

Standard IEEE 802.11 ac – Vylepšuje MIMO princip na MU-MIMO. Nevyužité antény komunikují s dalšími zařízeními v pořadí.

Standard IEEE 802.11 ax – Vylepšuje modulaci OFDMA, kde jako OFDM rozdělují informace do menších paketů. OFDMA navíc rozděljuje i kanál na menší frekvenční pásma, kde přenáší informace pro jiné zařízení.

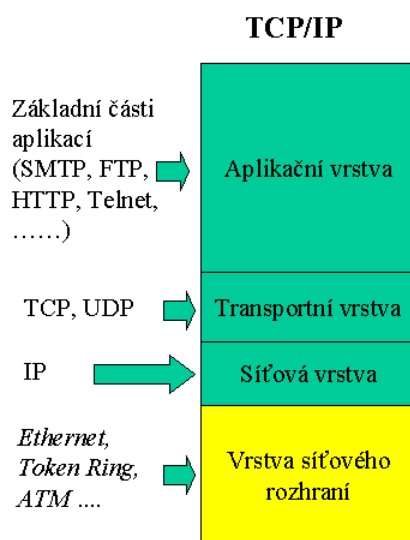
Standard IEEE 802.11 ah – Tento standard zvaný HaLow nemá nahradit předešlé standardy, ale spolupracovat s nimi. HaLow vysílá na nižší frekvenci, což sice snižuje rychlost sítě, ale za to podstatně vzroste dosah (až 1 km), sníží se spotřeba a zvětší se schopnost penetrace skrz překážky. Tato komunikace se využívá převážně pro obsluhu různých ovladačů, spotřebičů atd. (IoT – Internet of Things). HaLow se jeví jako zajímavá možnost i pro využití v této práci, ale z důvodů malé rozšířenosti a podpory je tento standard stále nedosažitelný.

Rozepsány byly pouze standardy, které jsou pro normu IEEE. Zbylé standardy pouze upravují určité parametry, aby byla komunikace efektivnější.



Obrázek 1-5 - Princip připojení k Wi-Fi [14]

Standardy IEEE popisují přenos dat pouze na lokální síti, ale neumožňují přenos mezi vzdálenými body. Tento nedostatek řeší protokol TCP/IP, který slouží právě pro komunikaci mezi dvěma vzdálenými body, které nejsou k sobě přímo spojené. Konkurentem pro TCP/IP bylo RM ISO/OSI, které oproti 4 vrstvému TCP/IP má vrstev 7. Rozdíl méně vrstev oproti více je v rychlosti a jednoduchosti na úkor spolehlivosti. [15]



Obrázek 1-6 - Rozdělení TCP/IP na vrstvy [16]

Aplikační vrstva – Slouží k přenosu konkrétních dat (http, vzdálená plocha TELNET).

Transportní vrstva – Kontroluje celistvost dat a uzpůsobuje síť k přenosu aplikační vrstvy. Pro kontroly máme 2 protokoly TCP (spojované) či UDP (nespojované).

Identifikace typu spojení dle portu (systémové, uživatelské, dynamické). Konečná adresace bude vypadat např. 147.153.134.12:32680.

Síťová vrstva – Adresace či směrování komunikace. Adresace probíhá dle standardů IPv4 (32 bitů). V poslední době je vyvíjen tlak na přechod na standard IPv6 (128 bitů) z důvodů přehlcení standardu IPv4, který už musel řešit problematika tzv. podsítěmi.

Fyzická vrstva – Adresace v lokální síti adresou MAC (48 bitů – 24 bitů výrobce, 24 bitů zařízení). Tato vrstva zprostředkovává drátové či bezdrátové připojení k prvnímu nejbližšímu uzlu.

1.5.2 Bluetooth

Technologie Bluetooth vznikla v roce 1994 firmou Ericsson. V roce 1998 vznikla organizace Bluetooth SIG, která Bluetooth od té doby drží mezi nejpoužívanějšími komunikacemi. Společnost je tvořena zástupci největších technologických firem, což umožňuje rychlou odezvu na požadavky. Od roku 2005 má komunikace i své označení standardu IEEE 802.15.1. Dle této normy je Bluetooth ad hoc (nahodilý) seskupení, což znamená, že všechna zařízení se mohou kdykoliv odpojit a jsou si pak rovnocenná. Bluetooth může pracovat ve 3 třídách podle výkonu.

Tabulka 5 - Výkonové třídy komunikace Bluetooth

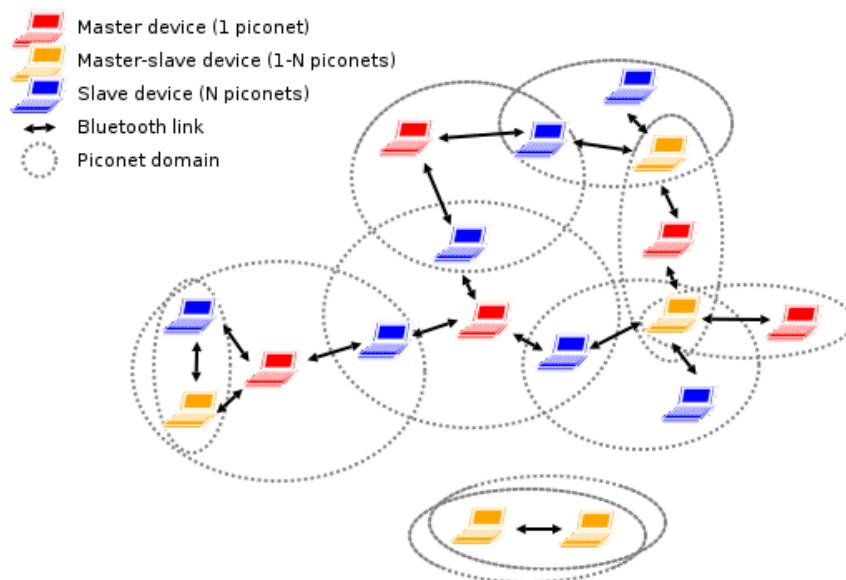
Třída	Výkon [mW]	Dosah [m]
1	100	100
2	2,5	10
3	1	1

V dnešní době se nejčastěji používá třída 2 s dosahem do 10 metrů. Tato třída je dostatečná pro zařízení, která využívají Bluetooth nejčastěji, jako jsou chytré hodinky či sluchátka.

Bluetooth vysílá na frekvenci 2,4 GHz (ve skutečnosti se jedná mezi 2,4 – 2,5 GHz). Kvůli práci ve stejném pásmu jako Wi-Fi nebo další zdroje rušení (jako je např. mikrovlnná trouba) je třeba signál modulovat metodou FHSS (rozprostřené spektrum s přeskokováním kmitočtu). Tato modulace vysílá na jedné frekvenci 625 μ s. Celkově je v komunikaci obsaženo 79 subkanálů, které jsou rozděleny po 1 MHz. Kromě FHSS je pro lepší stabilitu přenosu obsažena Gaussova modulace.

Bluetooth komunikace může být mezi dvěma nebo i více zařízeními. V případě komunikace mezi více zařízeními je zapojení v tzv. hvězdicové topologii. V obou případech je v síti zvolen master a ostatní zařízení jsou podřízenými depents. Master pouze dává ostatním klíč pro pseudonáhodné přeskoky modulace. Při použití více zařízení v síti je každému dána 3bitová adresa logického přenosu. Na jednoho mastera můžeme připojit pouze 7 zařízení. Při potřebě více zařízení se každý další může stát masterem. Kromě adresy logického přenosu má přijímač svou unikátní 48bitovou

adresu. Ta se dělí na dolních 24 bitů obsahujících informaci o přístupovém kódu a generaci frekvenčních kanálů, 8 bitů pro kontrolu dat a šifrování a posledních 16 bitů je udělených výrobcem zařízení. Celková komunikace probíhá výměnou paketů, které se skládají z přístupového kódu 72 bitů (identifikace a synchronizace), záhlaví 54 bitů (informace o spojení) a informačního pole 0-2745 bitů (uživatelská data). [17] [18]



Obrázek 1-7 - Bluetooth propojení více pikosítí [19]

Do této doby vzniklo celkem pět generací rozšíření, což jsou různé verze Bluetooth. Pátá generace pouze rozšiřuje dosah a rychlost čtvrté generace, kterou má zvolený mikroprocesor. Bluetooth 4.0 se rozšiřuje o Bluetooth Low Energy (BLE), které má mnohem nižší spotřebu. Jako klasické Bluetooth pracuje v pásmu 2,4 GHz s FHSS a Gaussovou modulací. BLE může pracovat ve 3 módech. Propagátor vysílá pakety, které skener přijímá, ale nechce komunikovat. Iniciátor pakety přijímá navazuje komunikaci a stává se v síti master. Datový paket se skládá z preamble 8 bitů (synchronizace), přístupové adresy 32 bitů, datové jednotky (datová propagace + datový paket) a CRC (cyklický kód na ověření správnosti přijmutí paketu). [20]

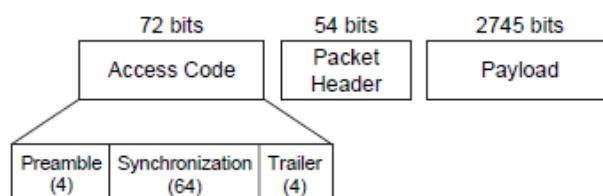
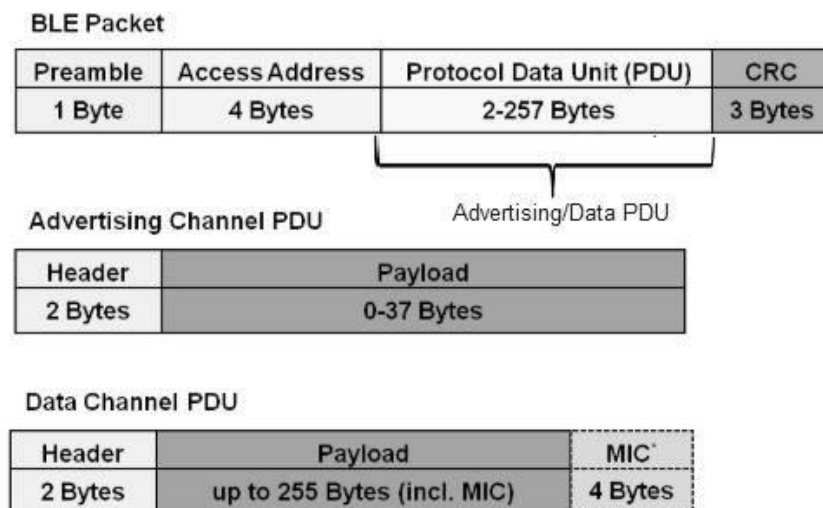


Figure 1: Packet format in Bluetooth.

Obrázek 1-8 – Bluetooth komunikační paket [21]



Obrázek 1-9 - Bluetooth low energy komunikační paket [22]

1.6 Návrh webového rozhraní

Tato kapitola se věnuje principům a jazyku, kterým se píšou webové stránky. Navrhovaný systém je určen do domácnosti a počítá s tím, že jej budou využívat i lidé, kteří nemají s takovou technikou žádné zkušenosti. Z tohoto důvodu je důležité navrhnout webovou stránku s ohledem na tuto skutečnost. Z pohledu neznalého uživatele je totiž nejpodstatnější právě grafická stránka a celková funkčnost systému bez nutnosti rozumět procesům na pozadí nebo samotné konstrukci zařízení. Webové stránky jsou v posledních letech velmi sofistikované, převážně z grafického pohledu a intuitivní manipulace. Proto byla také snaha, i přes hardwarové omezení mikrokontroléru, udělat stránky co nejvíce uživatelsky přívětivé.

1.6.1 HTML

Základním značkovacím jazykem pro každý webový server je jazyk HTML. Tento jazyk vznikl roku 1990 v CERNu pro sdílení naměřených a vypočtených dat mezi spolupracovníky. V průběhu let vznikl i jazyk XHTML, který vychází z HTML, ale je pouze jenom jeho zjednodušenou verzí. Jazyk HTML spočívá v definování tagů a jejich atributů pro zobrazení textu, obrázků či tabulek. Celý webový dokument má následně strukturu skládající se ze čtyř částí.

- Deklarace – Prohlížeči je oznámeno, že otevřel HTML dokument.
- Kořenový element - <html> prvek, který definuje celý dokument.
- Hlavička dokumentu - <head> definuje neviditelná data dokumentu (kódování, styly, název dokumentu, autora či titulek dokumentu).
- Tělo dokumentu - <body> tento prvek obsahuje vypsaná data a formát zobrazení.

Tento jazyk má nevýhodu v nepřehledném zápisu informací (u více stylů na malý text je zapsaný kód nečitelný). Druhou nevýhodou je neschopnost jazyka vykonávat operace při uživatelském přerušení. Proto je důležité využít dalších prostředků pro odstranění těchto nedostatků. Styly jsou proto nadefinované v hlavičce systému mezi tagy `<style>`, `</style>` přes kaskádové styly (zkr. CSS). Programová část je napsána v některém ze skriptovacích jazyků jako je PHP, Java Script a další. Pro programovou část byl vybrán jazyk Java Script, který je výhodnější pro aplikaci z důvodů řešení problematiky přímo na klientské části webové aplikace.

Veškeré obrázky umístěné na webu mají nevýhodu, která spočívá v jejich odkázání, na již existující stránky s umístěným obrázkem. Tato nevýhoda tkví v možnosti zrušení webu, kde je obrázek umístěn a stránka tak nebude nadále obrázek zobrazovat. Tento princip je zvolen z důvodu malé paměti na mikrokontroléru, kde by musel být obrázek uložen.

1.6.2 CSS

Tento popisovací jazyk kaskádových stylů byl vytvořen z důvodů oddělení formálních a designových úprav od samotné struktury obsahu. Tento styl měl být součástí HTML, ale z důvodu vývoje samotného HTML to nebylo možné. Tento jazyk vznikl v roce 1996 sdružením podnikatelů W3C, které zajišťuje správný chod systému World Wide Web a zároveň vydávají pravidelné aktualizace a standardy. Samotný styl se definuje v hlavičkovém dokumentu v tagu `<style>`. Tento zápis s využitím CSS zpřehlední zápis a umožní uživatelsky přívětivě měnit styl zápisu všem částem těla dokumentu, které se na daný styl odkazují. Výhodou jazyka CSS je jeho veřejné uznání a funkčnost na všech známých prohlížečích. S příchodem CSS bylo umožněno vytvoření stylizačních knihoven a také přibyla možnost ve velkém množství reprodukovat již použité styly či použít styly někoho jiného. Jediná jeho nevýhoda je v nedokončení určitých designových typů (oválné tvary např.). Tato nevýhoda však nemá na tuto práci vliv, protože ve vytvářeném webu nebudou nepodporované tvary použity.

1.6.3 Java Script

Javascript je událostmi řízený skriptovací jazyk pro vykonávání určitých funkcí webové stránky. Tento jazyk je spuštěn na straně klienta po stažení webové stránky. Proto byl tento způsob vykonávání funkcí (obnovování stránky, načítání hodnot z ESP32) vybrán. Konkurenční jazyk PHP vykonává veškeré funkce na serveru, a to by mohlo způsobit přetížení ESP32. Při použití Javascriptu je komunikace omezena pouze na požadavky nezbytných dat naměřených samotným mikrokontrolérem. Java script je zapisován kdekoli v HTML kódu v tagu `<script></script>`.

1.7 Cloudové služby

Tyto služby nabízí uživateli model tzv. cloud computing, což je model, kde všechny jeho servery, uložště či aplikace jsou nabízeny přes vzdálené připojení. Pro tento projekt je nejdůležitějším faktorem při výběru služeb možnost zálohování naměřených dat, a to především kvůli hardwarovým možnostem mikrokontroléru. Další podmínkou je dobré zobrazení dat, možnost práce s daty a jejich následný export do počítače uživatele. Posledním požadavkem je jednoduchá obsluha a dostatečná velikost pro data s tím, že toto vše bude zdarma. Dostupných cloudových služeb je spousta a je nutné si vybrat. Příkladem služeb splňujících požadavky může být Google Drive, Microsoft Onedrive či ThingSpeak.

1.7.1 ThingSpeak

Služba byla spuštěna v roce 2010 firmou ioBridge, která se zabývá tématem IoT. Tato služba byla vybrána z důvodu jednoduché manipulace s daty, které jsou zasílané na server, kdy jsou data okamžitě překreslována do grafu. Možnost zápisu zde není omezena na paměť, ale na množství zápisů, které zde činí 3 000 000 zápisů za rok zdarma a maximálně lze využít 4 kanály. Data je možné vyhodnotit online, kde lze za tímto účelem využít i MATLAB, či jej v CSV tabulce exportovat do počítače.

Pro komunikaci se serverem je nutné si zařídit účet na stránce www.thingspeak.com. Po přihlášení se nabídne možnost vytvoření vlastního kanálu, po kterém se data budou přenášet. Tomuto kanálu jsou nadefinovány hodnoty jako jeho název, množství hodnot, kterých může být na jednom kanálu až 8 a další nastavení parametrů, jako je propojení s GitHub, či informace o příchozích datech atd.

ThingSpeak™ Channels Apps Devices Support

Name: ESP32_Second_modul

Description:

Field	Value	Active
Field 1	Teplota	☒
Field 2	Vlhkost	☒
Field 3	Tlak	☒
Field 4	Osvětlení	☒
Field 5		☐
Field 6		☐
Field 7		☐
Field 8		☐

Obrázek 1-10 - Příklad založení uložště hodnot

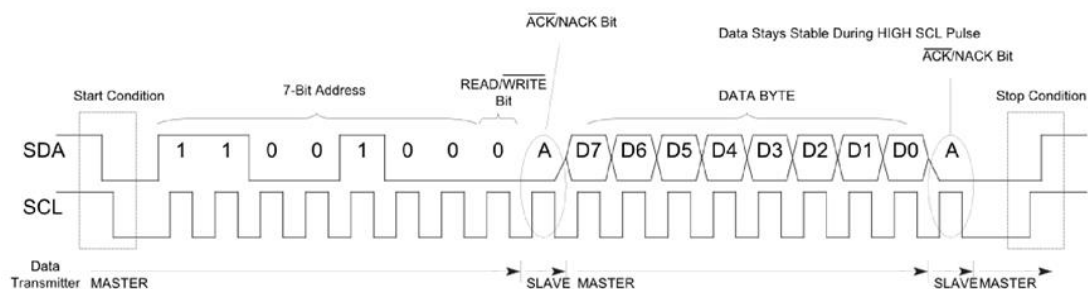
Následně je serverem přiděleno kanálu číslo a dva API klíče. Každý API klíč je specifický a s příchozím požadavkem určuje, či zařízení bude hodnoty zapisovat nebo je číst.

1.8 Použité sběrnice

1.8.1 Sběrnice I2C

I2C je jednou z nejvíce rozšířených komunikačních sběrnic od firmy Philips. Díky její popularitě je mnoho zařízení, které využívají právě tuto sběrnici pro komunikaci s okolím. Mezi tato zařízení patří paměti, převodníky a také senzory, které jsou v tomto návrhu využité. Sběrnice je synchronní, což znamená, že je zde synchronizační signál, který se nazývá hodiny (clock). Synchronizační signál slouží k přesnému určení, kdy mají jednotlivé zařízení na sběrnici číst data. Kromě synchronizačního signálu SCL je potřeba datového kanálu, který se často označuje SDA. Všechna zařízení jsou připojena k těmto kanálům, což umožňuje, aby každé zařízení komunikovalo s jinými zařízeními. Tato komunikace by ovšem nefungovala bez přítomnosti moderátora na sběrnici, a proto je jedno zařízení na sběrnici označováno jako master, který zajistí přístup ke sběrnici pouze jednomu zařízení. Zbylá zařízení jsou označována slave. Některá zapojení mají i více masterů, a proto se řídí speciálními pravidly, ale to není pro tento návrh důležité.

Protokol sběrnice je 9bitový. Master z počátku vypíše na kanál 7bitovou adresu určitého slave zařízení, se kterým chce komunikovat. Osmý bit slouží pro určení či chce data přijímat, nebo data odesílat. Pokud je bit nastaven do logické 0 znamená to, že master bude vysílat. Logická 1 by znamenala, že bude vysílat slave a master bude číst. Posledním bitem v komunikaci je potvrzovací bit, který slouží k tomu, aby zařízení slave potvrdilo svoji připravenost ke komunikaci. V obou režimech ukončí komunikaci master. V případě zápisu na kanál vytvoří stop frekvenci (SCL v logické 1). Pokud slave zapisuje na sběrnici a master mu nepotvrdí potvrzovací bit, je následně odpojen od kanálu.



Obrázek 1-12 - princip I2C komunikace [24]

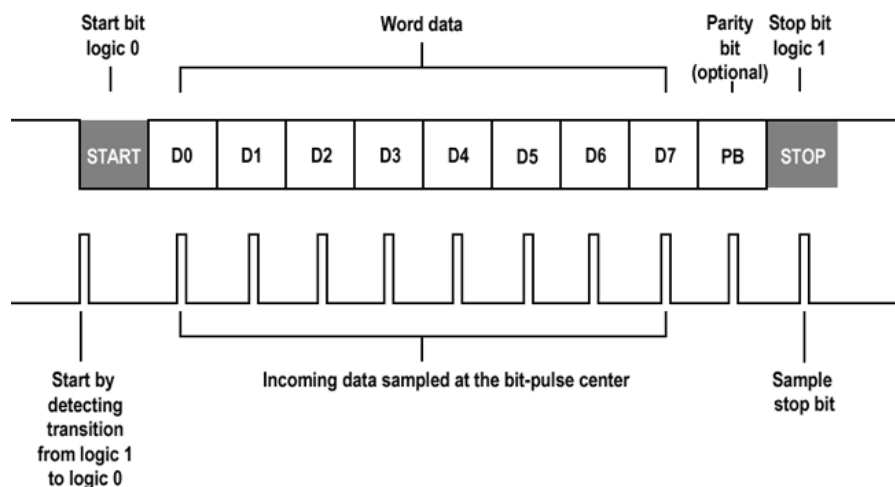
Adresa má 7 bitů a z tohoto důvodu může na sběrnici být připojeno až 127 zařízení. Kvůli velkému nabízenému sortimentu se adresy v zařízení kryjí, a to by způsobilo kolizi dat na kanálu. Proto bylo nutné vybrat z nabídky vhodné zařízení i z hlediska adresace. [25]

1.8.2 UART

UART je zkratka pro Universal asynchronous receiver and transmitter, což můžeme do češtiny přeložit jako univerzální asynchronní přijímač a vysílač. Jak z názvu vyplývá sběrnice nemá jednotný distribuovaný hodinový signál, a proto každé zařízení musí mít svůj vlastní. Sběrnice je tvořena dvěma vodiči, které nesou označení Tx (transmit – vysílač) a Rx (receiver – přijímač). Často se jedná o systémy open-collector či open-drain. Tyto vodiče mají obě zařízení a jejich zapojení je realizováno zkřížením zmíněných vodičů (Tx -> Rx a Rx -> Tx). Komunikace na sběrnici probíhá v několika krocích. Při neaktivní sběrnici je sběrnice v log. 1 (úroveň HIGH). Při odesílání je nutné jako první na sběrnici poslat START bit, který je naznačen na sběrnici log. 0. Po START bitu přichází datový rámec, který může být tvořen 5-8 bity, při nevyužití parity jej lze nastavit i na 9 bitů. Nejčastější hodnota je však 8 bitů (1 Byte). Po datovém rámci následuje parita, která se používá k základní ochraně dat před ztrátou bitu. Parita je dvojího typu, a to sudá a lichá. Tato ochrana dokáže detekovat pouze lichý počet chyb.

Tento druh kontroly ale není obvykle využíván. Data jsou ukončena STOP bitem, který je prerezantovaný log.1. Sběrnici UART je udávána rychlost přenosu dat uživatelem v jednotce Baud. Baud je jednotka, která nám udává počet změn úrovně na sběrnici za sekundu. Do této jednotky se počítají i START, STOP a paritní bity, a proto je nutné si uvědomit, že přenosové rychlosti jsou o něco menší.

UART je v mikrokontrolérech používán k programování samotného mikrokontroléru a zároveň může být použit i ke komunikaci s dalšími zařízeními. Piny pro UART, na které jsou zařízení připojena, bývají nejčastěji udány výrobcem. Některé mikrokontroléry mají ovšem multiplexer, který umožňuje si v programovacím rozhraní zvolit, které piny budou uděleny pro určitý UART (př. Mikrokontroléru – ESP32 – WROVER – E). Ne všechny sběrnice lze externě využít kvůli jejich zakomponování do interní struktury pro komunikaci např. s interní pamětí.



Obrázek 1-13 - Princip UART komunikace [46]

Sběrnice UART je ve vylepšené formě USART, kde je možnost data přenášet synchronně. Synchronní data jsou přenášena s menší chybou a lze je přenášet i při vyšších rychlostech než asynchronní. [46]

1.9 Výběr RTC-obvodu

Tento integrovaný obvod je navržen pro udržení a aktualizaci času. V obvodu čipu jsou obvykle integrovány i obvody pro připojení RTC obvodu na určitou sběrnici. I přes to, že RTC funkci může dělat samotný mikrokontrolér je tu řada výhod, které má použití odděleného integrovaného obvodu RTC. Těmito výhody jsou:

- možnost osvobození mikrokontroléru od dílčí úlohy čítače času,
- možnost napájení obvodu malou baterií, pokud by došlo k výpadku proudu.

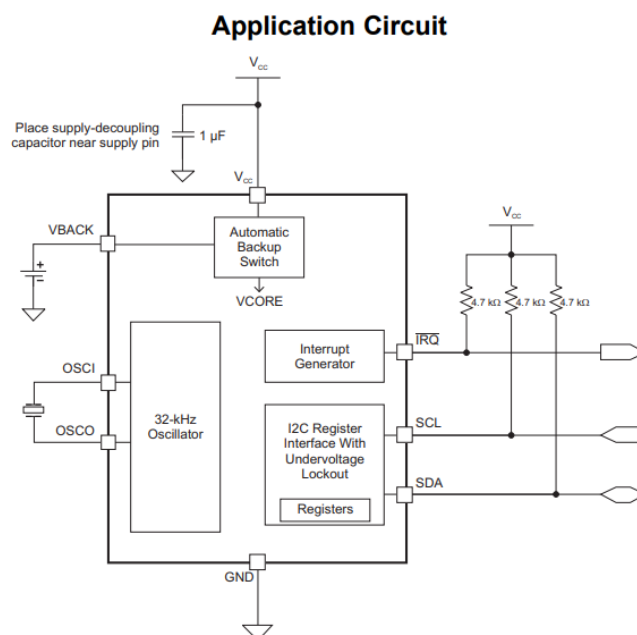
Všechny RTC obvody fungují na podobném principu, ale mohou mít různé typy napájení, rozdílná komunikační rozhraní s nadřazenou jednotkou nebo i různé možnosti přerušení nebo budíků. RTC integrovaných obvodů je na trhu spousta, a proto je nutné vybrat obvod odpovídající požadavkům této práce:

- přesný oscilátor,
- úměrná cena,
- komunikace přes I2C,
- možnost integrace do systému.

Dle dostupnosti byly vybrány 2 RTC obvody, které odpovídaly požadavkům. Jedná se o BQ32002D od firmy TEXAS INSTRUMENTS a DS3231mz od firmy MAXIM.

1.9.1 BQ32002D

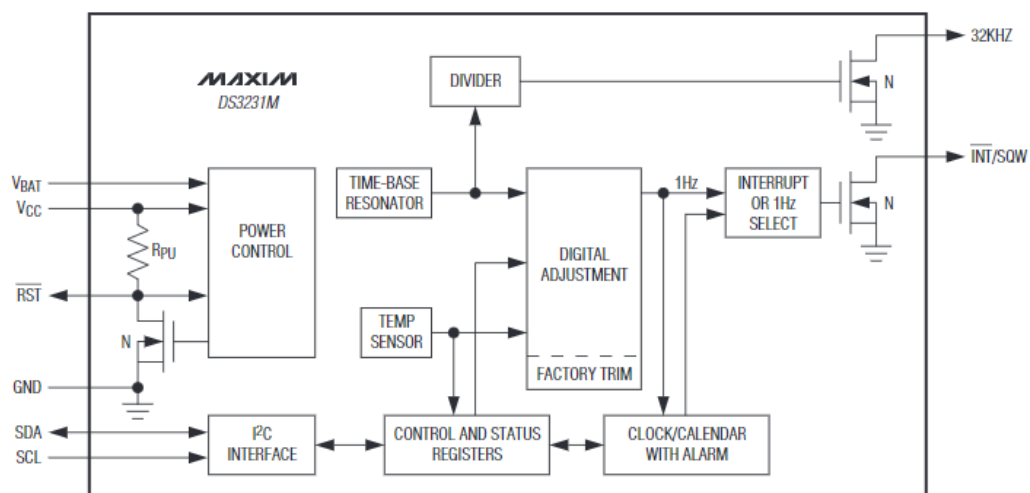
Tento integrovaný obvod plně odpovídá požadavkům na navrhovaný systém. Největší nevýhodou tohoto obvodu je vyvedení vývodu pro zapojení oscilátoru, protože, jak lze odvodit z katalogového listu a zapojeního krystalu na 32,768 kHz dosahuje hodnoty nepřesnosti oscilátoru ± 35 ppm, což by znamenalo chybu téměř kolem 3 sekund na den. Taková chyba není akceptovatelná, a při zapojení by musel být obvod neustále kalibrován. Další nevýhodou je absence teplotní kompenzace, která by mohla způsobit v různých místnostech odlišně velké nepřesnosti. Jeho velkou výhodou je nízká cena, která se pohybuje kolem 20 Kč. Výhodou je i možnost komunikace přes sběrnici I2C. Obvod má také vývod pro přerušení, ale ten není v navrhovaném systému využit. [42]



Obrázek 1-14 - Blokové schéma RTC IO BQ32002D [42]

1.9.2 DS3231mz

Tento obvod již má integrovaný oscilátor i s teplotní kompenzací, který zaručuje co největší přesnost hodinového signálu. V katalogovém listu je uváděna nepřesnost kolem 5 ppm. Po přepočtu tato hodnota vychází na 0,43 s na den. Po průzkumu trhu bylo zjištěno, že se jedná o jednu z nejmenších možných chyb, které bylo u komerčních produktů zjištěno. Tato kvalita ovlivňuje cenu na trhu, proto je cena RTC vysoká a pohybuje se kolem 60 Kč. Mezi jeho výhody patří i komunikace přes I2C sběrnici a možnost restartu či přerušení, které v navrhovaném systému by nebyly využity. [43]



Obrázek 1-15 - Blokové schéma RTC IO DS3231mz [43]

1.9.3 Vybrání vhodného obvodu

I přes vyšší cenu byl vybrán obvod DS3231mz kvůli jeho vysoké přesnosti. Jeho velkou výhodou je i jeho dobrá přístupnost. RTC tohoto typu je možné sehnat i na modulech a lze je zakoupit ve více obchodech v ČR za velice příznivé ceny kolem 100 Kč. Další výhodou je velká softwarová podpora obvodů RTC od firmy MAXIM.

2. MĚŘENÍ NEELEKTRICKÝCH VELIČIN

Měření neelektrických veličin je součástí každodenního života. K tomu, aby se docílilo správného změření a vyhodnocení dané veličiny je zapotřebí nějakého převodníku, který neelektrickou veličinu převede na elektrickou (napětí, proud či změnu elektrické veličiny). Tyto převodníky se nazývají senzory a nachází se v téměř všech elektrických zařízeních. Neelektrických veličin, které se mohou měřit, je velké množství (teplota, vlhkost, tlak, osvětlení, koncentrace plynů atd.), a proto existuje i mnoho různých senzorů. V této kapitole budou rozebrány pouze senzory, které budou v práci využité.

2.1 Měření teploty

Měřit teplotu se lidé snažili už odedávna. První zmínky o měření teploty s využitím roztažnosti plynů se objevili již ve starověku. Ke zlepšení metod měření teploty došlo až v 18. století. Měřidla z této doby však pouze ukazují, jak se roztáhla určitá kapalina při změně teploty, a nelze je využít pro elektronické zpracování naměřených hodnot.

V dnešní době existuje mnoho metod, které lze využít pro měření teploty i s možností převodu naměřené neelektrické veličiny na elektrickou. Základní dělení teplotních senzorů je podle metody měření. Jedná se o metody kontaktní a bezkontaktní. Bezkontaktní metody jsou příliš nákladné a pro měření v této práci, ve které se měří teplota okolí v domácnosti, není potřeba využít této metody, ale stačí použít metodu kontaktní, která je levnější i když na úkor určité chyby měření. Tato kapitola se bude zabývat pouze kontaktní metodou a podrobněji rozebrány budou jen její nejznámější zástupci.

2.1.1 Odporové kovové senzory

Aktivním prvkem tohoto senzoru je kov. Kov má tu vlastnost, že při zvyšující se teplotě začne jeho krystalická mřížka kmitat, a tím ve struktuře dojde ke srážkám vodivých elektronů s krystalickou mřížkou. Také se uvolňují nové elektrony, ale první jev je mnohem dominantnější, to způsobí, že se zvyšující se teplotou odpor roste.

Tento způsob měření má své výhody v podobě dobré linearity, velkého měřicího rozsahu, přesnosti a opakovatelnosti. Mezi jeho nevýhody patří cena, nižší citlivost, pomalejší reakce na skokové změny a skutečnost, že při neoptimálním návrhu měření dochází k zahřívání kvůli protékajícímu proudu.

Nejznámějšími zástupci jsou platinové senzory s označením Pt100 (100Ω při $0\text{ }^{\circ}\text{C}$) a Pt1000 (1000Ω při $0\text{ }^{\circ}\text{C}$). [26] [27]



Obrázek 2-1 - Pt100 a Pt1000 [28]

2.1.2 Termočlánky

Termočlánek využívá Seebeckova jevu, který popisuje generaci napětí za předpokladu, že jsou spojeny dva různé kovy, na jejichž koncích je rozdílná teplota. Tato teplota se může následně vypočítat ze vztahu

$$\Delta U = \alpha_{12} * \Delta T, \quad (2.1)$$

kde α_{12} je rozdíl Seebeckových koeficientů pro daný kov. Tento vztah je zjednodušen linearizací a může do systému vnést určité odchylky. Termočlánky mají velký rozsah měření a dobrou linearitu. Naopak mají malou citlivost v řádech desítek μV . Nejčastěji je využíván termočlánek K (Cr-Al) a J (Fe-CuNi). [26] [27]



Obrázek 2-2 - Termočlánek typu K [29]

2.1.3 Odporové polovodičové senzory

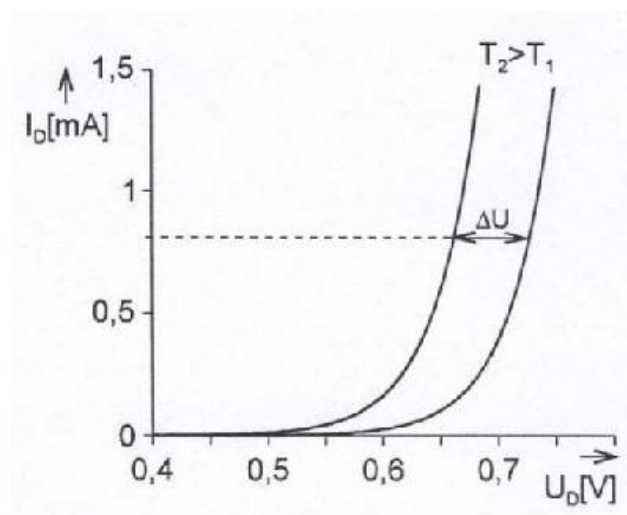
Tyto senzory dělíme podle krystalické struktury na monokrystalické a polykrystalické.

Polykrystalické senzory se nazývají termistory. Jejich důležitým parametrem je změna rezistivity, která vytváří značnou nelinearitu a měření je kvůli tomu obtížnější. Naopak mají velkou citlivost pro teploty běžného okolí. Jsou to velmi malé součástky nejčastěji vyráběné tlustovrstvou technologií a od toho se odvíjí i jejich malá cena. Taky reakce na skokové zvýšení teploty je rychlejší než u kovových. Podle změny rezistivity

dělíme termistory na PTC termistory (s teplotou se zvyšuje i rezistivita) a NTC termistory (s teplotou rezistivita klesá). [26] [27]

Monokrystalické senzory můžeme dělit na senzory bez PN přechodu, které dále dělíme na intrinsické a extrinsické, nebo podle počtu PN přechodů. U Intrinsického senzoru odpor s teplotou odpadá, což je zapříčiněno neustálým uvolňováním nových elektronů do vodivostního pásu. U extrinsického senzoru, kterým je dotovaný křemík, se jeho hodnota odporu s teplotou zvyšuje. Tyto senzory nejsou moc používané z důvodu špatné linearitu.

U senzoru s přechodem PN velice záleží na zvoleném materiálu přechodu. Galium-Arsen diody mohou být použité i do velmi nízkých teplot (až $-272\text{ }^{\circ}\text{C}$). Zatímco křemíkové přechody jsou často používané pro měření teploty okolí (-50 až $150\text{ }^{\circ}\text{C}$), kde i přes exponenciální funkci je v běžných teplotách okolí průběh funkce téměř lineární. Tyto přechody mají záporný teplotní koeficient. [26]



Obrázek 2-3 - Charakteristika diody pro různé teploty [30]

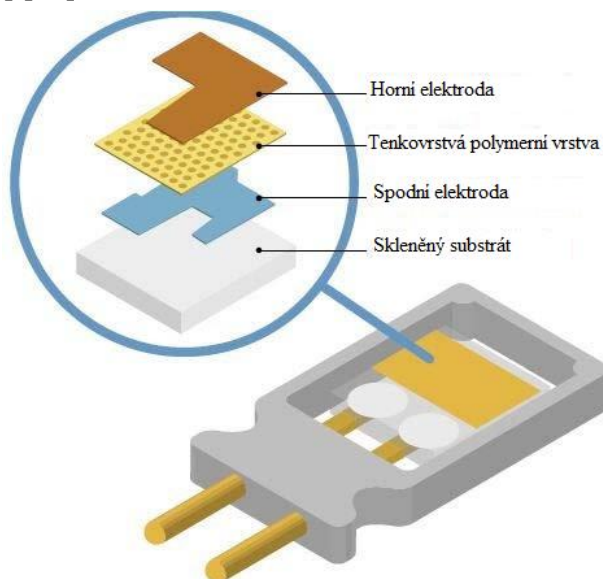
2.2 Měření vlhkosti

První měřidla vlhkosti byla založena na principu roztažnosti absorpčních materiálu při zvýšené vlhkosti, a následně se vyhodnocovala změna váhy či rozměru. V 19. stoletím byla vynalezena účinnější metoda měření pomocí psychrometru. Klasický psychrometr se skládá ze dvou teploměrů, z čehož jeden je ponořen ve vodě a druhý je v měřeném prostředí. Jejich hodnoty se porovnají s tabulkovými hodnotami a tím se zjistí požadovaná hodnota. Tato metoda by byla na automatizování velice nákladná a náročná na prostor, proto se od této metody ustupuje.

2.2.1 Kapacitní senzor vlhkosti

U měření vlhkosti pomocí kapacitního senzoru se využívá sorpce dielektrického materiálu a následná změna jeho permitivity, která v konečném důsledku vytvoří změnu

kapacity kondenzátoru. Tyto senzory mají velkou výhodu ve velikosti, poměrně dobré linearizaci a ceně. I u těchto senzorů je využita technologie tenkých a tlustých vrstev. Značná nevýhoda může být v přístupu dielektrika k okolí, čímž dochází k jeho rychlému stárnutí. [26] [31]



Obrázek 2-4 - Kapacitní senzor vlhkosti [32]

2.2.2 Odporový senzor vlhkosti

Měření vlhkosti odporovými senzory dělíme na měření přímé a nepřímé. Přímá metoda slouží pro měření pevných látek, kde měřený objekt je zároveň i aktivní vrstvou a měří se jeho vodivost. Nepřímá metoda spočívá v měření rozdílu teplot jako u psychrometrů popsaných výše, vyrábí se pomocí technologie tenké nebo tlusté vrstvy. Další možností je měření odporu sorpčního materiálu. Tyto senzory mají nevýhodu v možné kontaminaci senzoru. [26] [31]



Obrázek 2-5 - Odporový senzor vlhkosti [33]

2.2.3 Nepřímá metoda měření vlhkosti

U měření vlhkosti stojí za zmínku zvláštní typ měření pomocí záření. Záření, které je emitované ze zdroje bývá vodní parou pohlcováno a měřicí technikou je vyhodnocena celková absorpce, která je úměrná vlhkosti vzduchu. Tato metoda nejčastěji pracuje v ultrafialové oblasti (121–123 nm), nebo infračervené oblasti (6,25 μm). Výhodou je velmi rychlá odezva. Mezi velké nevýhody by však patřila vysoká cena a větší rozměry. [31]

2.3 Měření tlaku

Měření tlaku v domácnosti je důležitou součástí měření z více důvodů. Důvodem může být zdravotní stav (při změně tlaku nastávají zdravotní komplikace jako bolest hlavy či krvácení z nosu), nebo určení počasí, kdy při sníženém tlaku je pravděpodobné, že bude oblačno a déšť, zatímco při vysokém tlaku nejčastěji pozorujeme bezoblačnost a slunečný den.

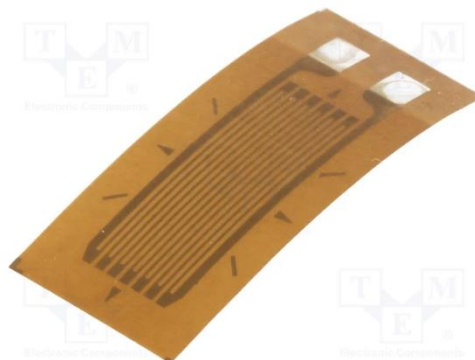
V minulosti vzniklo mnoho přístrojů, které měří tlak v kotlích či pneumatikách. Tyto senzory jsou mechanické, a pro je lepší do malého integrovaného zařízení spíše využít senzory MEMS (Micro Electro Mechanical Systems). Tyto senzory jsou nejčastěji už integrované na křemíkové desce, a tak k nim můžeme rovnou integrovat další obvody pro co nejlepší měření např. teplotní kompenzace, zesílení, převod i komunikaci.

2.3.1 Kapacitní měření

Tento princip měří změnu kapacity kondenzátoru, který má jednu elektrodu pevnou a druhá je pružná. Pružná elektroda je pak v závislosti na tlaku je pak vykláněna/vzdalována od pevné elektrody a tím dochází ke změně kapacity. U měření tohoto typu se nejčastěji využívá ještě druhý kondenzátor, který slouží jako reference pro dobrou eliminaci nežádoucích vlivů okolí. [26]

2.3.2 Tenzometr

Tenzometr či tenzometrický rezistor je odporový senzor, u kterého je změna odporu způsobena deformací. Tato deformace může být způsobena tlakem či tahem. Tenzometry mohou být kovové (foliové, drátkové či napařené) nebo polovodičové (monokrystalické, polykrystalické). Nevýhodou tenzometrů je jejich závislost deformace na teplotě, a proto je nutné kvůli správnému vyhodnocení měřit i teplotu a tento vliv pak odečíst. [26]



Obrázek 2-6 - Foliový tenzometr [40]

2.3.3 Piezoelektrický senzor

Tyto senzory fungují na piezoelektrickém jevu, což je fyzikální jev, který při deformaci krystalu krystalických dielektrických látek způsobí dipólový elektrický moment. Při tlakovém působení na krystal se krystal začne chovat jako generátor elektrického signálu, který je možné snímat a určit jaký tlak byl na krystal vyvíjen. Tento děj je vratný a senzor se může opakovaně využívat. [26]

2.4 Měření osvětlení

Měření intenzity osvětlení je často využíváno pro získání informací o světle v místnosti. V případě dvoustavových senzorů můžeme pouze zjistit, jestli je místnost osvětlena nebo ne. Při využití analogových senzorů je možné zjistit i množství světla a určit z jakého zdroje světlo svítí (lampička, hlavní světlo či Slunce).

Při měření osvětlení se nejčastěji využívá polovodičových materiálů, u kterých se při osvětlení vybudí elektrony z pásu valenčního do pásu vodivostního. Toho je možné využít u většiny základních součástek jako je rezistor (vyroben polovodičem), dioda, tranzistor či tyristor.

2.4.1 Fotorezistor

Při osvětlení dopadne foton na elektron struktury, tento elektron bude vybuzen a zvýší vodivost fotorezistoru. Ve tmě je odpor senzoru velký a se zvyšujícím se množstvím světla klesá logaritmicky. Fotorezistor má velkou nevýhodu v podobě dlouhé doby odezvy.

2.4.2 Fotodioda

Fotodioda je dioda, na kterou může dopadat světelné záření. U diod můžeme na rozdíl od fotorezistoru pracovat ve 2 módech. V prvním módu se dioda chová jako rezistor citlivý na světlo a v druhém se chová jako zdroj elektrické energie. V kterém módu

bude dioda fungovat záleží na kvadrantu ve V-A charakteristice, ve kterém se bude nacházet. Závěrně zapojená dioda v odporovém děliči bude fungovat v III kvadrantu. V propustném směru připojená na voltmetr bude pracovat jako zdroj elektrického napětí.

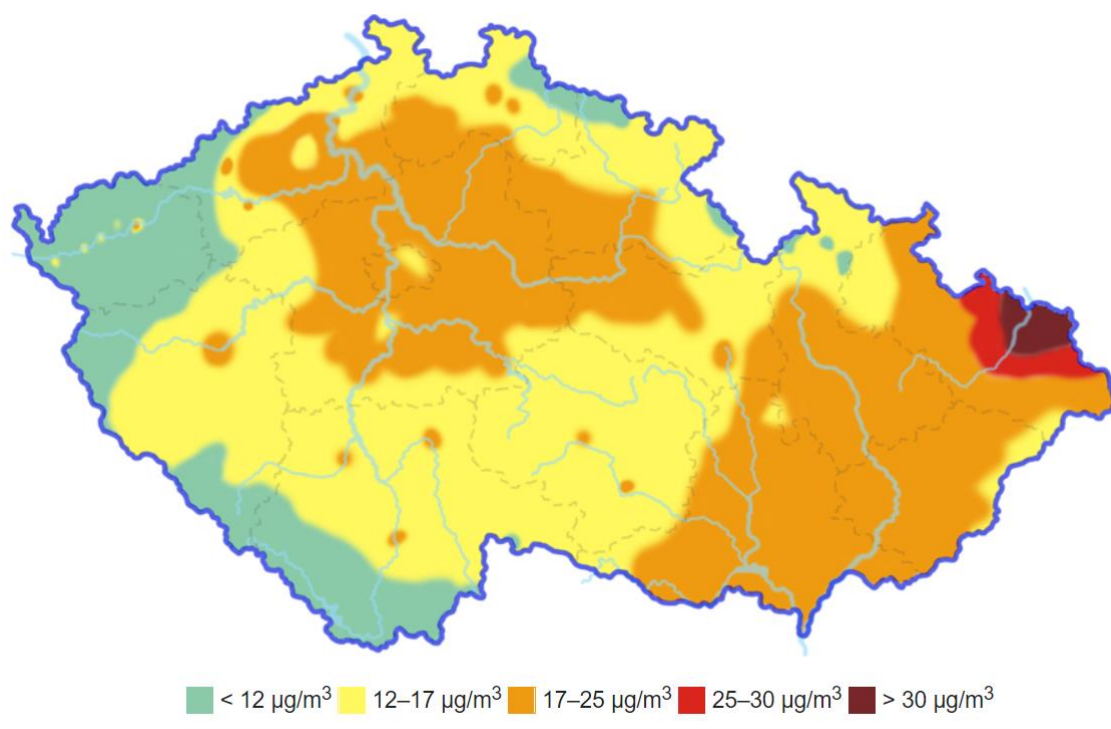
2.4.3 Fototranzistor

Fototranzistor je bipolární tranzistor, který je zapojen se společným emitorem. Světlo osvítlí oblast báze-emitoru a tranzistor se otvírá víc. Světlo má v tomto případě stejný vliv na tranzistor jako zvyšování bázevého proudu. Přechod báze-emitor se může představit jako fotodioda. Vývod pro bázi může být zachován, ale častěji je fototranzistor realizován jako dvou vývodová součástka. Od fotodiody má fototranzistor hlavní výhodu v citlivosti, kde proud fotodiodou je zesílen beta krát.

2.5 Měření pevných částic vzduchu

Měření pevných částic neboli prachových částic je důležité pro obyvatele domu ze zdravotních důvodů. Těmito pevnými částicemi jsou myšleny částice pevného skupenství, které jsou objemem tak malé, že je schopen je unášet vítr. Zdroje těchto částic dělíme na primární a sekundární. U primárního zdroje tyto částice vznikají. Příkladem může být dieselový motor bez filtru na pevné částice, obrus pneumatik či vaření. Sekundární zdroj je takový zdroj, který tyto částice pouze rozvíří. Příkladem sekundárního zdroje může být větrem rozvířený stavební materiál jako cement či vápno.

Měření těchto pevných částic je většinou uskutečňováno optickými senzory, které fungují na principu vysílače a přijímače, kdy se měří jejich útlum. Měřit můžeme více skupin pevných částic. Tyto skupiny bývají z pravidla označovány PM_x, kde x udává velikost částic v μm . Nejčastěji měřené skupiny jsou PM₁₀ (částice 10 μm a menší) a PM_{2,5} (částice 2,5 μm a menší). [41]



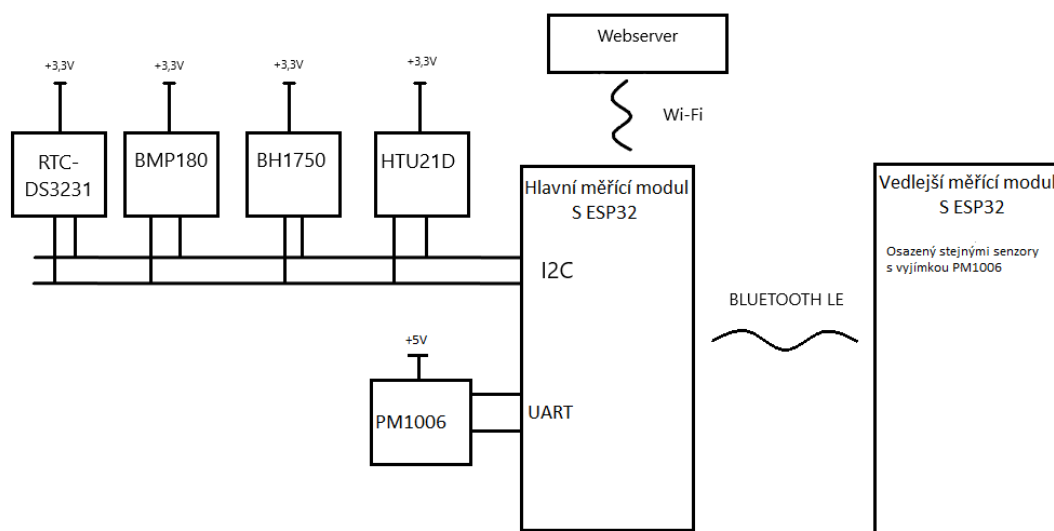
Obrázek 2-7 - Průměrná koncentrace pevných částic v ČR [41]

3. NÁVRH SYSTÉMU

U každého návrhu systému je důležité najít určitý kompromis. Tento kompromis spočívá v zaručení náležité přesnosti, kompatibility, funkcionality atd. systému oproti celkové ceně produktu. Do celkového návrhu vstupuje pojem jednoduchost, který dokáže také prodražit výsledný produkt. Z důvodů měření parametrů v domácnosti patří mezi hlavní požadavky této práce převážně nízká cena a jednoduché uživatelské rozhraní. Velká přesnost (chybovost pod 1 %) zde není příliš podstatná.

3.1 Blokové schéma

Blokové schéma navrženého měřicího zařízení je na obrázku 3-1. Zařízení bude fungovat na principu centrální komunikace, kde se všechna zařízení připojují právě k hlavní stanici. Hlavní ESP32 je navrženo pro zpracovávání dat z okolních stanic a zároveň zpracovává webový server a jeho požadavky. Zároveň je již jako měřicí stanice, díky tomuto se ušetří na počtu použitých stanic. Centrální jednotku je vhodné umístit ideálně do středu domu.



Obrázek 3-1 - Blokové schéma zapojení

3.2 Použité senzory a další hardware

V této podkapitole se bude rozebírat veškerá hardwarová výbava systému, kterou ESP32 obsluhuje. Nebude chybět ani kompletní rozbor parametrů i ceny a zhodnocení, proč byl zvolený senzor přidán.

3.2.1 Senzor pro měření teploty a vlhkosti – HTU21D

Tento senzor dokáže měřit teplotu i vlhkost. Výrobce zaručuje velký rozsah měřitelných teplot od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $125\text{ }^{\circ}\text{C}$. V tomto rozsahu je zaručena chyba pouze $\pm 0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Vlhkost je možno měřit v celém rozsahu od 0-100 % RH. Výrobce udává chybu $\pm 2\text{ }%$ pouze v intervalu od 5-95 % RH. V hodnotách mimo interval není chyba uvedena. Senzor je nízkonapěťový na 3,3 V, a proto je i ideální k mikrokontrolérům řady ESP32, které mají operační napětí stejné. Modul, na kterém je senzor připojen, má v sobě integrován i stabilizátor pro napětí vyšší než 3,3 V. Spotřeba senzoru je uváděna jako $450\text{ }\mu\text{A}$. Taková spotřeba je příznivá i pro bateriové napájení. Senzor je navržen pro komunikaci přes sběrnici I2C s adresou 0x40.

Tento senzor byl vybrán kvůli jeho nízké ceně při poměrně vysoké přesnosti měření, nízké spotřebě a jednoduchosti integrace do systému. [34]



Obrázek 3-2 - Senzor HTU21D [35]

3.2.2 Senzor osvětlení – BH1750

Senzor měří analogově osvětlení. Na základě uživatelem zaznamenaných hodnot a vzdáleností od zdroje lze zjistit i typ osvětlení, který na senzor svítí (hlavní světlo, lampička či světlo z mobilu). Senzor je schopný měřit do 65 000 luxů s citlivostí nepřesahující 4 luxy. Senzor může být napájen 3,3 V i 5 V. Maximální odběr senzoru se pohybuje kolem $200\text{ }\mu\text{A}$, což je hodnota, která je pro bateriové napájení optimální. Modul je navržen pro komunikaci se sběrnici I2C s adresou 0x23.

Senzor byl vybrán převážně pro jeho velice malou cenu, přijatelnou citlivost, jednoduchost a možnost analogového zpracování světla. [36]

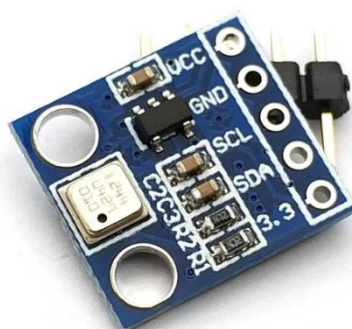


Obrázek 3-3 - Senzor BH1750 [37]

3.2.3 Senzor tlaku – BMP180

Senzor BMP180 v sobě integruje dvě funkce, a to měření teploty a tlaku. Měření teploty má rozmezí pouze jen $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ s rozptylem až 2 %. Z tohoto důvodu je měření teploty přenecháno senzoru HTU21D, který má přesnost i rozsah lepší. Senzor je v systému kvůli měření tlaku. V měřených hodnotách se pohybuje kolem atmosférických hodnot od 300 až 1100 hPa s chybou $\pm 0,12\text{ hPa}$. Napájení senzoru je od 3 V do 5 V s odběrem lehce přesahující 500 μA . Modul je navržen pro komunikaci přes sběrnici I2C s adresou 0x77. Cena produktu je 50 Kč.

Senzor kombinuje jednoduchost a nízkou cenu. Tlak je zde měřen v absolutní hodnotě. [38]



Obrázek 3-4 - Senzor BMP180 [39]

3.2.4 Senzor pevných částic – PM1006

Senzor PM1006 je hotovým produktem pro měření pevných částic menších než $2,5\text{ }\mu\text{m}$. Do projektu byl zahrnut kvůli jeho dobré ceně vzhledem k ostatním sensorům pro měření pevných částic na trhu, které dosahují i řádu tisíců korun. Senzor byl původně

součástí již hotového produktu VINDRIKTING, který prodává řetězec IKEA. Produkt VINDRIKTING dosahuje přijatelné ceny, která je o několik stovek nižší než cena samotného senzoru, kdyby se koupil samostatně. Provedení není koncipováno ideálně pro číselné výstupy, protože senzor výsledek měření uživateli poskytuje ve formě barvy LED.

Hodnoty naměřené senzorem jsou zpracované v integrovaném mikrokontroléru, který slouží i pro komunikaci s vnějším prostředím. Komunikace je tvořena sběrnici UART a je navržena pro rychlost přenosu na 9600 Baudů/s, s délkou slova 8 bitů, 1 stop bitem a bez paritního bitu. Pro získání naměřených dat je nutné zaslat na pin senzoru RX 5 bytů 11 02 0B 01 E1. Následně dojde odpověď 20 bytů, kde po přepočtu vyjde množství prachových částic v jednotkách $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

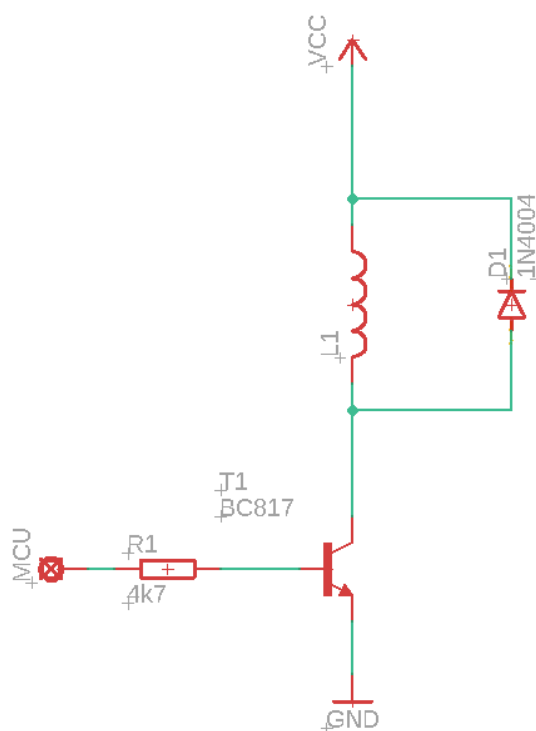
Senzor dokáže měřit hodnoty od 0–1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ s chybou měření $\pm 20\%$ z měřené hodnoty při podmínkách $25\text{ }^\circ\text{C} \pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ a $50\% \text{ RH} \pm 10\% \text{ RH}$. Tyto hodnoty jsou pro provoz v domácnosti dostačující. Při obvyklé hodnotě 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ je chyba 3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, která není pro člověka zdravotně závadná. Velkou výhodou je i garance dlouhé životnosti dané výrobcem senzoru na 5 let.

Senzor je napájen 5 V a je zde problematika s komunikací s mikrokontrolérem ESP32, který funguje na 3,3 V. Problém v propojení sběrnic je nutné vyřešit jednosměrným či obousměrným převodníkem logických úrovní. V tomto projektu je použit obousměrný převodník logických úrovní SN74LVC2TDCUR od firmy Texas Instruments. Proudová spotřeba senzoru je pod 30 mA, ale i taková spotřeba může způsobit problémy v low power návrhu, kde je nutné počítat s minimální 4 s odezvou na odeslaný příkaz pro měření.

Senzor je velice náchylný na tzv. otravu. Tato otrava spočívá v naakumulování různých pevných částic, prachu atd. v měřicí šterbině, což zapříčiní špatně změřené hodnoty i přes správný návrh měřicí aparatury. Nejjednodušší možností, jak se zbavit otravy, je způsobit tok vzduchu, který bude měřicí komoru omývat vzduchem. Produkt VINDRIKTING již má ventilátor umístěn na těle senzoru na obrázku 3-5 (zadní strana). Ventilátor je řízen NPN tranzistorem, který je zapojen na pin mikrokontroléru. Toto zapojení umožňuje možnost regulovat otáčky ventilátoru podle potřeby pomocí PWM regulace. Kvůli induktivnímu charakteru ventilátoru je nutné ochránit tranzistor před napěťovými špičkami, které vznikají při vypínání tranzistoru. Použitá ochrana je vytvořena zapojením diody v závěrném směru paralelně k ventilátoru. Zapojení ventilátoru je naznačeno na obrázku 3-6. [44][45]



Obrázek 3-5 - VINDRIKTING – ovládací prvek + senzor PM1006 [44]



Obrázek 3-6 - Zapojení ventilátoru na DPS

3.3 Návrh baterie pro RTC obvod

RTC obvody mají nejčastěji 2 vývody pro napájení. Jedním je vývod pro klasické napájení Vcc a druhé pro napájení z baterie Vbat. Jakmile je obvod připojen přes napájení ze zdroje, je vývod pro napájení z baterie odpojen. Při odpojení hlavního zdroje napájení (odpojení uživatelem, výpadek elektřiny) by došlo ke ztracení časových údajů a uživatel by musel nastavovat nový čas. Výpadky elektřiny a odpojení od zdroje nejsou častým jevem, a proto může být navržena baterie s nízkou kapacitou a bez potřeby znovu baterii nabíjet.

Podle katalogového listu bylo zjištěno, že napájecí napětí na pinu pro baterii je od 2,3V do 5,5V a celkový proudový odběr je při neaktivní I2C sběrnici pouze 2-3 μA . Mikrokontrolér při odpojení hlavního zdroje nefunguje, a proto baterie bude RTC obvod napájet pouze při neaktivní I2C sběrnici. Hodnota proudu pro výpočet byla zvolena jako 3 μA , a s její pomocí se dopočítáme k hraniční hodnotě, která může nastat.

$$P_{\text{RTC}} = I_1 * t_1 = 3 * \frac{60}{60} = 3 \mu\text{Ah} \quad (3.1)$$

Z rovnice 3.1 je vidět spotřeba kapacity baterie, která odpovídá 1 hodině při připojeném obvodu k baterii. Baterie je zde záložním zdrojem. Díky tomu je možno vybrat baterii, která je levná, má nízkou kapacitu a nemusí být nabíjecí. Na základě těchto požadavků byla zvolena baterie CR2032, která je díky komerci velmi levná, a přesto má pro účely této práce dostatečně velkou kapacitu. Kapacita této baterie je 220 mAh, která je v rovnici označena jako C_{BAT} .

$$t = \frac{C_{\text{BAT}}}{P_{\text{RTC}}} = \frac{220 * 10^{-3}}{3 * 10^{-6}} = 73333,33 \text{ h} \rightarrow 8,37 \text{ roku} \quad (3.2)$$

Zvolená baterie by dokázala RTC obvod napájet přes 8 let dle výše zmíněné rovnice 3.2. Tento údaj je více než dostačující, protože většinu času bude RTC napájeno z napájecího napětí Vcc.

3.4 Návrh napájení pro moduly

Hlavní modul nemůže být napájen baterií kvůli správě serveru Wi-Fi sítě, Bluetooth Low Energy a senzorům, které zvyšují odběr celého ESP32. Při měření ESP32 byl naměřen odběr kolem 300 mA, a nejvíce se na něm podílí samotný mikrokontrolér. Tento proud nelze z důvodu připravenosti pro uživatelské požadavky zredukovat uspáváním mikrokontroléru, a proto musí být hlavní modul napájen ze sítě.

Vedlejší modul ovšem přistupuje k hlavnímu modulu pouze jednou za určitou dobu, a proto je možné tento modul napájet bateriově, aby se zamezilo zbytečnému plýtvání s volnými zásuvkami v domácnosti. Proto je jej možné uspávat v době, kdy spolu

nekomunikují. ESP32 má více typů uspaní podle toho, které periférie jsou využívány. Díky použití pouze časového buzení vnitřním RTC modulem lze použít režim `deep_sleep`, který zaručuje odběr kolem 150 μA . Odběr proudu byl měřen dvakrát, poprvé při funkci Bluetooth a posílání hodnot a podruhé při uspaném mikrokontroléru. Při prvním měření modul odebíral 85 mA a tento stav trval téměř 20 sekund. V druhém měření senzor odebíral 1,5 mA a na odběru se nejvíce podílí připojené senzory. Délka uspaní mikrokontroléru byla zvolena jako 10 minut, aby měl hlavní modul více vzorků za hodinu pro kvalitnější data na webové stránce. Proto výpočet se uvažuje setrvání obvodu v odesílací části 120 s/hodinu a v části, kde je mikrokontrolér uspaný, na 3480 s/hodinu.

$$P = I_1 * \frac{t_1}{3600} + I_2 * \frac{t_2}{3600} = 85 * \frac{120}{3600} + 1,5 * \frac{3480}{3600} = 4,28 \text{ mAh} \quad (3.3)$$

Vypočítaná hodnota z rovnice 3.3 uvažuje nejhorší možné stavy, kterými může být nepřipojení se ani na jeden pokus v hodině, maximální odběry mikrokontroléru nebo senzorů. Při úspěšném propojení obou mikrokontroléru trvá Bluetooth komunikace mnohem kratší dobu, a to jen okolo poloviny doby, kterou by mikrokontrolér vynaložil pro neúspěšné vyhledávání hlavního modulu. I při nejhorších možných stavech je dobré zaručit funkčnost výrobku na dobu bez nabití. Tato doba byla zvolena 1 měsíc, aby uživatel nemusel mít neustále modul na nabíječce, a zároveň je z důvodu ochrany baterie modul při nabíjení zcela nefunkční.

$$C_{bat} = I * t = 4,28 * (24 * 30) = 3081,6 \text{ mAh} \quad (3.4)$$

Pro zaručení funkčnosti baterie po celý měsíc musí mít kapacitu 3081,6 mAh. Baterie ovšem stárnou a mají i spoustu negativních vlastností během používání, a proto byla zvolena baterie s větší kapacitou 3450 mAh, aby byl chod zaručen.

Baterie bude nabíjena modulem pro nabíjení lithiovo-iontových baterií s TP4056 s ochranou proti zkratům. Tento modul je na základě stavu baterie schopen ji znova nabít a hlídat veškeré její charakteristiky. Uživateli je stav baterie znázorněn pomocí LED-diod umístěných na nabíjecím modulu. Ve fázi klasického nabíjení je možné nastavit proud, který bude baterii dobíjet. Baterii bývá doporučeno nabíjet 10 % její kapacity po dobu 10 hodin. Z tohoto důvodu byl zvolen proud 300 mA. Proud je na modulu zvolen pomocí rezistoru umístěného na modulu. Modul původně obsahoval rezistor pro nabíjení baterie jedním ampérem, a proto musel být změněn na hodnotu vypočtenou z rovnice 3.5.

$$R_{PROG} = \frac{U_{PROG}}{I_{CHARGE}} * 1200 = \frac{1}{0,3} * 1200 = 4000 \Omega \quad (3.5)$$

Kde U_{PROG} je referenční napětí na rezistoru, I_{CHARGE} je požadovaný nabíjecí proud pro baterii a R_{PROG} je požadovaný odpor. Z důvodů omezení výrobní řadou byl rezistor zaokrouhlen směrem nahoru na hodnotu $4,7\text{k}\Omega$.

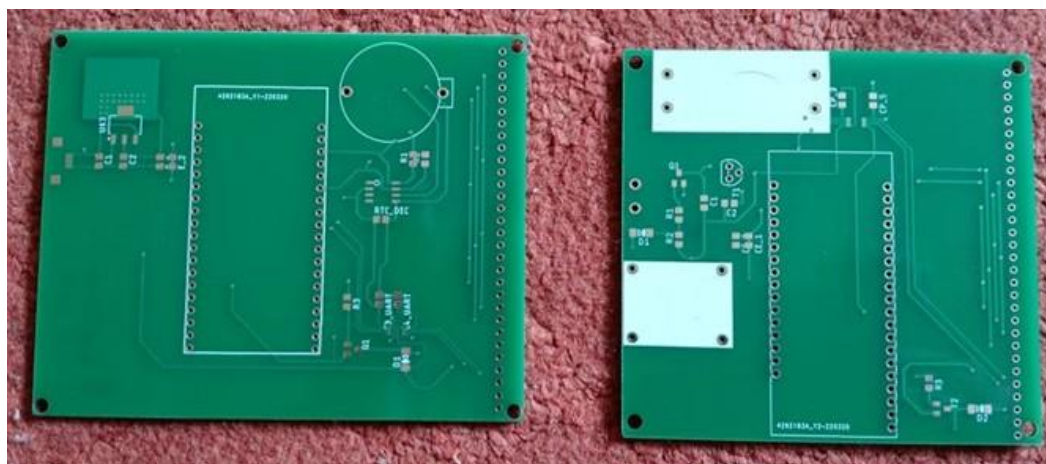
3.5 Zhotovení zařízení

Nejdůležitější částí byl návrh desky plošných spojů. Pro tento úkon byl použit software EAGLE, který umožňuje návrh schématu i návrh desky plošných spojů.

Realizovány byly 2 desky plošných spojů s tím, že jedna byla pro centrální jednotku a druhá pro vedlejší modul. Obě verze mají stejné parametry pro výrobu.

Desky byly vytvořené z materiálu FR4 (základní materiál sklolaminát s pojivem z epoxidové pryskyřice). FR4 materiálů je více druhů s různými vlastnostmi. Díky tomu, že se nevyužívá příliš vysokých frekvencí na desce či výkonových součástkách, bylo možné objednat nejlevnější FR4-Standard.

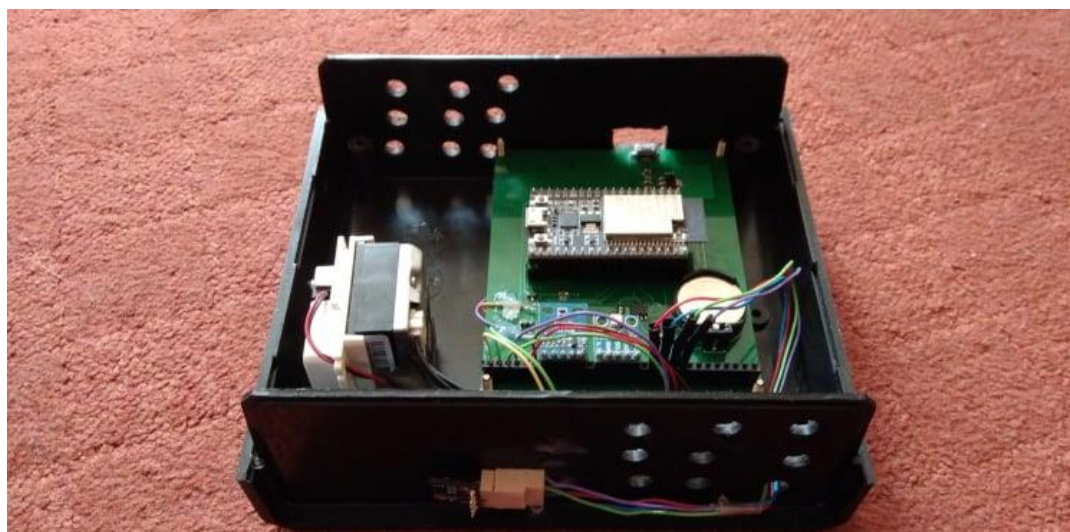
Deska je navržena oboustranně. Tento krok umožňuje návrháři větší pohodlí pro vytváření spojů mezi součástkami, a přitom se za tento krok nepřiplácí. Tloušťka desky bývá kritická pouze u návrhu s mechanickým namáháním desky, vysokofrekvenčními návrhy či výkonovými prvky pro tlustší měď. Navrhované zařízení tyto parametry neobsahuje, a proto byla zvolena standartní deska s tloušťkou 1,6 mm. Tloušťka mědi byla zvolena $35\text{ }\mu\text{m}$. Obvod neobsahuje velké úbytky napětí s velkým protékajícím proudem, a proto nebylo nutné volit větší tloušťku za větší cenu. Pro povrchovou úpravy byla navržena metoda olovnatý HAL (Hot Air Leveling). Tato metoda odporuje normám RoHS, které říkají, že zařízení v domácnostech by neměla obsahovat toxické a nebezpečné materiály jako je olovo. Důvodem jejího vybrání je převážně cena, protože za tuto úpravu se nepřiplácí. Zařízení je pouze prototypem a při zavedení do domácnostech by byl použit bezolovnatý HASL. V rámci zakázky bylo možné vykonat kompletní test, který umí odhalit zkratky mezi vodiči a otevřené obvody v ceně desky bez prodloužení čekací doby.



Obrázek 3-7 – Vyrobené desky plošných spojů pro hlavní i vedlejší modul

Výslednou desku plošných spojů je nutné umístit do krabičky z více důvodů. Prvním důvodem je mechanická ochrana zařízení před rozbitím samotné desky či připojených senzorů. Druhým důvodem je zamezení přístupu uživatele k systému. Pro realizaci byl vybrán kryt z polystyrenu, který odpovídá napěťovým kritériím, která jsou u tohoto produktu do 50 V. Kryt byl následně upraven pro možnost zařízení napájet či dobíjet baterii a pro lepší výměnu vzduchu s okolím byly vyvrtány průduchy na bocích krytu. Na vrchní straně byl zhotoven otvor pro senzor osvětlení. Touto dírou by byl uživatel schopný proniknout do zařízení, a proto bylo na otvor přidáno plexisklo, které má dobré vlastnosti na propouštění světla, a přitom je dostatečně pevné proti mechanickému poškození a dokáže zabránit uživateli ve vniknutí do systému. Zařízení je ukotveno na distančních sloupcích kvůli ochraně samotné desky a měděných cest.

Senzor na měření teploty a vlhkosti musel být umístěn na vnější stranu krytu z důvodu zkreslování výsledků kvůli vznikajícímu teplu v krytu převážně kvůli mikrokontroléru ESP32.



Obrázek 3-8 - Zkompletovaný hlavní modul



Obrázek 3-9 - Zkompleťovaný vedlejší modul

3.6 Finanční rozvaha zařízení

Tato kapitola se zabývá celkovou finanční rozvahou práce pro vytvořené moduly. V konečné ceně budou zahrnuty náklady na součástky a ochranný kryt. Dále je uvažována i cena za práci, která zahrnuje osazení desek plošných spojů, mechanickou činnost na ochranném krytu a vytvoření softwarové výbavy zařízení. Ceny uvedené v tabulkách jsou pouze orientační a na základě zvoleného dodavatele se mohou lišit.

Tabulka 6 - Náklady na výrobu hlavního modulu

Součástka	Dodavatel	Cena [Kč]
Mikrokontrolér – ESP32 WROVER-E DevKit C	Transfer Multisort Elektronik Sp. z o.o.	304
Senzor osvětlení – BH1750	ECLIPSERA s.r.o.	57
Senzor tlaku – BMP 180	ECLIPSERA s.r.o.	49
Senzor teploty a vlhkosti – HTU21D	ECLIPSERA s.r.o.	169
Senzor pevných částic – VINDRIKTING	IKEA Česká republika s.r.o.	299
RTC modul	GM electronic, spol. s.r.o.	59
Ochranný kryt – Z4F PS black	GM electronic, spol. s.r.o.	90
Deska plošných spojů	JLCPCB	30
Součástky pro osazení na DPS	GM electronic, spol. s.r.o.	100
Mechanické díly	GM electronic, spol. s.r.o.	50
Celkem		1507

Tabulka 7 - Náklady na výrobu vedlejšího modulu

Součástka	Dodavatel	Cena [Kč]
Mikrokontrolér – ESP32 – LOLIN 32	LaskaKit	298
Senzor osvětlení – BH1750	ECLIPSERA s.r.o.	57
Senzor tlaku – BMP 180	ECLIPSERA s.r.o.	49
Senzor teploty a vlhkosti – HTU21D	ECLIPSERA s.r.o.	169
Baterie NCR-18650GA	GM electronic, spol. s.r.o.	299
Modul pro nabíjení Li-Ion baterií TP4056	LaskaKit	12
Ochranný kryt – Z4F PS black	GM electronic, spol. s.r.o.	90
Deska plošných spojů	JLCPCB	30
Součástky pro osazení DPS	GM electronic, spol. s.r.o.	80
Mechanické díly	GM electronic, spol. s.r.o.	50
Celkem		1134

Dalším faktorem, který určuje cenu zařízení je cena práce. Konstrukce zařízení zahrnuje více typů prací. Mezi tyto práce patří návrh zařízení, konstrukční práce, kam patří osazení desky plošných spojů nebo vytvoření ochranného krytu, vývoj obslužných programů pro mikrokontroléry a vývoj webových stránek. Návrhu zařízení bylo věnováno kolem 30 hodin. V rámci návrhu zařízení se jednalo převážně o výběru mikrokontroléru, měřených veličin, senzorů k měření zvolených veličin, použití bezdrátových technologií a dalšího hardwaru. Oba moduly jsou po stránce návrhu téměř totožné, a díky tomu se ušetřil čas při návrhu vedlejšího modulu. Konstrukční práce zabrala na obou deskách celkově 10–15 hodin pro každý modul. Poslední částí byl vývoj programu a webových stránek. Vývoj na hlavním modulu trval téměř 80 hodin kvůli tvorbě nejen programu ale také webových stránek. Obslužný program vedlejšího modulu byl zhotoven do 10 hodin. Celková práce trvala kolem 140 hodin. Při současných maržích vývojářů by práce stála okolo 30 000 Kč.

Časy jsou pouze orientační, protože při vývoji systému bylo potřeba se naučit novým dovednostem, jelikož na této práci se dělalo bez předchozích zkušeností s Bluetooth Low Energy a Javascriptem. Při konstrukci a ožívování desky plošných spojů se vyskytly určité problémy s převodníkem logických úrovní a zdrojem napájení. Tyto problémy způsobili zdržení prací a celkového dokončení zařízení. Často bylo nutné i vyměnit některé komponenty, a to způsobilo i značné prodražení finálního zařízení.

Rozpočet jen pro toto jedno zařízení by tedy bylo kolem 33 000 Kč. Reálně je ovšem práce rozložená při sériové výrobě do více kusů.

4. POPIS PROGRAMOVÉ FUNKCE

Tato kapitola je zaměřena na softwarové vybavení zkonstruovaného zařízení. Kvůli rozdílným funkcím hlavního a vedlejšího modulu mají tyto moduly rozdílný program. Program hlavního modulu se zabývá vytvořením vlastní Wi-Fi sítě, připojením k domácí Wi-Fi síti, vytvořením Bluetooth serveru a odesíláním dat ze všech modulů na ThingSpeak. Dále zde bude probrána funkce webových stránek a jejich grafické rozhraní.

Program vedlejšího modulu je zaměřen na Bluetooth komunikaci s hlavním modulem a na své uspání pro co nejmenší spotřebu.

Programy pro mikrokontroléry ESP32 byly napsány ve vývojovém prostředí Arduino IDE. V první části programu je místo pro definování konstant, deklarování proměnných a odkázání na použité knihovny. Následně program zavolá funkci `setup()`, která slouží pro funkce zavolané pouze při startu mikrokontroléru. Poslední částí je funkce `loop()`, která po doběhnutí programu sama sebe následně volá. Toto prostředí podporuje použití mnoha dostupných knihoven pro různé periférie. Bylo zde možno využít knihovny pro Wi-Fi komunikaci, Bluetooth komunikaci, senzory, RTC modul, správu flash paměti a také knihovnu pro obsluhu I2C sběrnice. Pro vytvoření stránky v HTML jazyku a JavaScriptu bylo využité prostředí Geany, které umožňuje zobrazit aktuální vzhled stránky i během tvorby webu. Napsané kódy jsou příliš obsáhlé, a proto zde bude popsána pouze funkce hlavního programu a stránek.

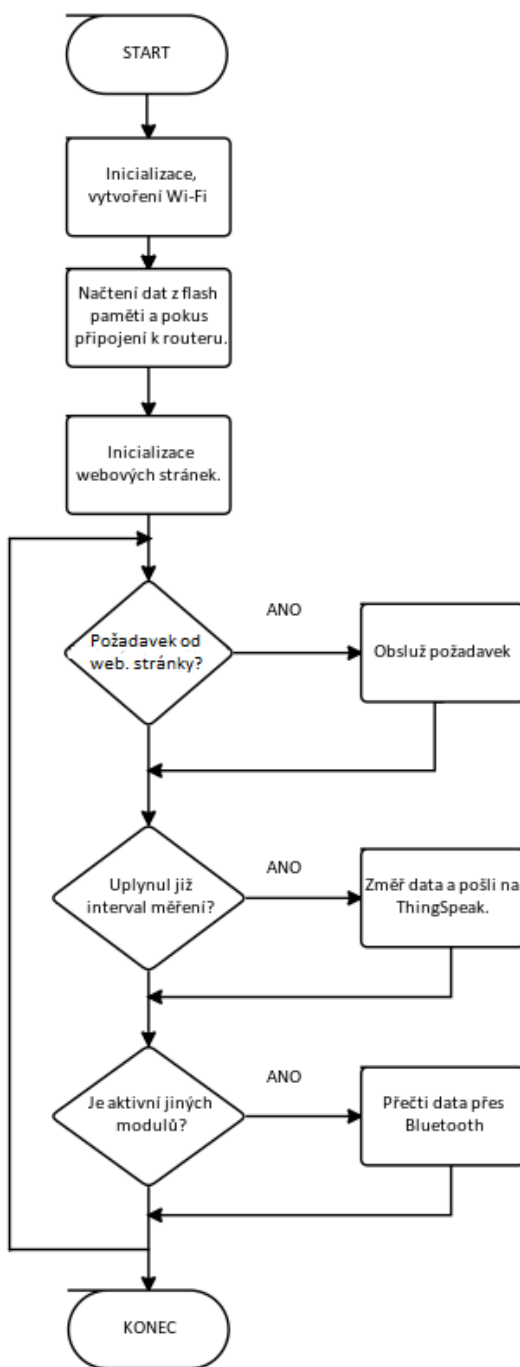
4.1 Program ESP32 – hlavní modul

Běh programu lze vidět na vývojovém diagramu, který je na obrázku 3-8. Po zapnutí jsou nadefinovány konstanty a odkazy na použité knihovny a odkazy na webové stránky. Jsou zde nadefinovány zpětná volání pro BLE a pro vytvořenou Wi-Fi síť mikrokontrolérem jsou zde nadefinovány funkce pro nahrazení atributů o stavu připojení k domácí síti.

V `setup` části definujeme vstupně/výstupním pinům jejich mód. V případně výstupních pinů i jejich hodnotu. V případě této práce se definuje směr pro převodník logických úrovní a stav ventilátoru na senzoru PM1006. Poté jsou nastaveny parametry pro komunikaci UART se senzorem PM1006 a inicializuje se sběrnice I2C, připojené senzory a komunikace s cloudovou službou ThingSpeak. Dále program nastaví parametry Wi-Fi sítě jako je režim sítě (přístupový bod, zařízení či obojí). Pro přístupový bod jsou definovány IP parametry, kde budou vytvořené stránky zobrazeny. Tyto stránky a její funkce jsou následně definovány. V tento moment je i zjištěno, či je ve flash paměti uložena již nějaká Wi-Fi síť, ke které byl modul připojen a pokud nějaké údaje jsou, pokusí se s ní znovu spárovat. Následně program definuje funkce pro

hlavní stránku připojenou k domácí síti. Poslední částí funkce setup je inicializace a definice Bluetooth Low Energy serveru.

V nekonečné smyčce loop() je program, který zajišťuje, že jednou za interval určený uživatelem odešle naměřené hodnoty na cloudovou službu. Součástí této smyčky je i kontrolní podmínka pro vysílání Bluetooth Low Energy a jeho případné znovunastavení.



Obrázek 4-1 - Vývojový diagram hlavního modulu

4.1.1 Připojení jako přístupový bod

Uživatel pro správný chod programu musí nahrát informace o své domácí Wi-Fi síti. Nejvíce uživatelsky přívětivé je vytvoření vlastní Wi-Fi sítě mikrokontrolérem, kde je možnost webovou stránku sloužící k přihlášení umístit na zadanou IP adresu, v tomto případě je IP adresa zvolena 192.168.1.5. Na webové stránce zobrazené na obrázku 4-2 je kolonka pro přihlášení na Wi-Fi síť, kde je nutné vyplnit SSID a heslo sítě. Po odeslání těchto dat se mikrokontrolér pokusí na zvolenou síť připojit. Výsledky tohoto kroku jsou vypsány pod kolonkou. V případě správného přihlášení je vypsán název sítě a udělená IP adresa od routeru. Vypsaná IP adresa je důležitá z důvodu rozdělení adres od routeru, který adresy rozdává téměř náhodně na základně již připojených zařízení a dalších vnitřních parametrů routeru. V případě nepřihlášení nebo chybného zadání informací je pod kolonkou vypsána červeným písmem chybová hláška.

Při přihlášení na tuto síť jsou předem dané přihlašovací údaje v podobě SSID: TempLog a hesla: 123456789. Z důvodů bezpečnosti je doporučeno uživateli změnit toto heslo kvůli snadnému naborování do systému, proto byla přidána možnost změny hesla pro tento přístupový bod. Kolonka se změnou hesla je na stejné stránce jako přihlášení k domácí síti. ESP32 nedovoluje, aby hesla pro přístupový bod byla kratší než 8 znaků, a proto je kolonka omezena HTML jazykem, aby uživatel zadal minimálně těchto 8 znaků.

The screenshot shows a web browser window with the address bar displaying '192.168.1.5'. The page title is 'Vítejte na Access Pointu mikrokontroléru ESP32-WROVER-E, tato stránka slouží pro připojení mikrokontroléru k Wi-Fi. Prosím zadejte jméno a heslo Wi-Fi'. Below the title is a 'Login Wi-Fi' form with two input fields: 'jméno:' and 'heslo:', and an 'Odeslat' button. Below the form, the text 'Již jste přihlášen.' is displayed, followed by 'SSID_WIFI: chlumeckyv2' and 'IPv4: 10.0.1.17'. Below this, there is a section for password change titled 'Změna hesla' with a 'nove heslo:' input field and a 'Změnit' button. The text 'V případě potřeby změny hesla. Heslo musí obsahovat nejméně 8 znaků. Po změně hesla dojde k pádu připojení k Wifi, tak i komunikace s AP. Je nutné se znovu připojit s nově zadáním heslem. (pozn. u některých telefonů musíte dát zapomenout na síť)' is displayed above the password change form.

Obrázek 4-2 - Access Point webová stránka pro přihlášení

4.1.2 Připojení jako zařízení

Po připojení k domácí Wi-Fi síti dojde k vysílání webové stránky pro zobrazení výsledků uživateli pomocí ESP32 na routerem přidělenou IP adresu. Při výpadku elektrické energie či restartu se nemusí uživatel znovu přihlašovat díky zálohovaným údajům o síti ve flash paměti, ke kterým se ihned po připojení opět přihlásí. Problém může nastat v případě, když je zařízení od Wi-Fi odpojeno (restart, výpadek napájení) a router přidělí zařízení jinou IP adresu, než jakou uživatel předtím dostal. Uživatel je nucen se znovu přihlásit na stránku, vytvořenou na přístupovém bodě, a dostat novou IP adresu.

Na stránce se nachází blok, který ukazuje čas serveru. Tento čas je nahrán z mikrokontroléru, který tento údaj získal z RTC obvodu. Aby nedošlo k přehlcení komunikace mezi serverem (ESP32) a stránkou, je tento údaj na stránku nahrán pouze při jejím spuštění a následnou inkrementací díky javascriptu na pozadí stránky. Čas a datum lze změnit pomocí textového pole pro vstup, který je pomocí HTML udělán tak, aby uživatel mohl pomocí kalendáře zvolit určité datum a určit čas pomocí rolovacího pole.

Samotné zobrazení naměřených hodnot probíhá tak, že stránka pošle pomocí javascriptu požadavek na server o aktuální hodnoty ve formátu jeden požadavek na jednu hodnotu, jak pro hlavní, tak pro vedlejší modul. Z hlavního modulu je možné dostat aktuální hodnoty, zatímco z vedlejšího modulu jsou zobrazené údaje staré maximálně 10 minut. Toto je způsobeno tím, že vedlejší modul je v režimu deep sleep (více v kapitole 4.2). Hodnoty se aktualizují při obnovení stránky nebo po uběhnutí zadaného měřicího intervalu, který slouží i pro odesílání naměřených dat na stránky ThingSpeak. Při zadávání intervalu je nutné, aby uživatel zadal nezáporné číslo, které bude větší než určitý čas, v opačném případě by mikrokontrolér nestíhal vyřizovat požadavky od stránky a zároveň komunikaci s cloudovou službou ThingSpeak. Z tohoto důvodu bylo použito numerické textové pole, které je omezeno spodním intervalem na jednu minutu.

V posledním bloku jsou zobrazeny použité senzory a jejich parametry s hypertextovým odkazem na jejich katalogový list. Pro tento blok byla použita rolovací okna, aby uživatel mohl k informacím přistoupit, ale aby tyto informace při opakovaném přístupu uživateli nezavazela.

Celá stránka má lepší grafický design díky možnosti připojení stránky k internetu přes router a tím je umožněno odkazovat se na obrázky, ikony a hypertextové odkazy a zahrnout i různé úpravy fontu textu a HTML struktur přes CSS soubor, který je volně dostupný na internetu.

Aby byla umožněna komunikace s cloudovou službou ThingSpeak je nutné mít ESP32 připojeno k routeru s možností připojení k internetu. Je nutné si založit http požadavek pro stránku ThingSpeak. Jeden kanál má maximálně 8 zápisových polí a do každého pole musí být vyplněna maximálně jedna veličina. Následně jsou tyto hodnoty

poslány na přidělený kanál s uděleným API klíčem. To samé se provede i pro vedlejší modul. Po odeslání hodnot se mikrokontrolér od komunikace odpojí a čeká až uplyne interval, který byl zadán uživatelem, poté znovu vytvoří spojení a odešle nové hodnoty.

Vítejte na měřicí stanici pro vaši domácnost
Tato stránka zprostředkuje komunikaci a obsluhu senzorů.
Nalezá se zde i kompletní informace o využití hardwaru a mnoha dalšího.

Čas serveru
17. 5. 2022 21:09:44

Změna času serveru

Datum: 
Čas: 

Změřené hodnoty
Tento odstavec umožní sledování měřených veličin.

Měřená veličina	Hlavní modul	Modul 1
 Teplota:	21.85 °C	20.85 °C
 Vlhkost:	42.77 %RH	46.46 %RH
 Osvětlení:	26.67 luxů	0.00 luxů
 Tlak:	97954 hPa	97782 hPa
 Pevných částic:	26 µg/m³	%% µg/m³

Nadcházející kolonka vám dává možnost změnit čas mezi jednotlivými měřeními.
Zadané číslo je chápáno v sekundách.

Změna intervalu měření

Interval měření:

Použité senzory

Měření teploty a vlhkosti

Měření tlaku

Měření osvětlení

Měření pevných částic

 Senzor PM100GK.
Tento senzor měří kontaminaci prostoru pevných částic.
Tyto částice jsou například sypké materiály (mouka, prach, saze).
Chcete vědět více? [Zde](#)

Obrázek 4-3 - Webová stránka pro měření veličin

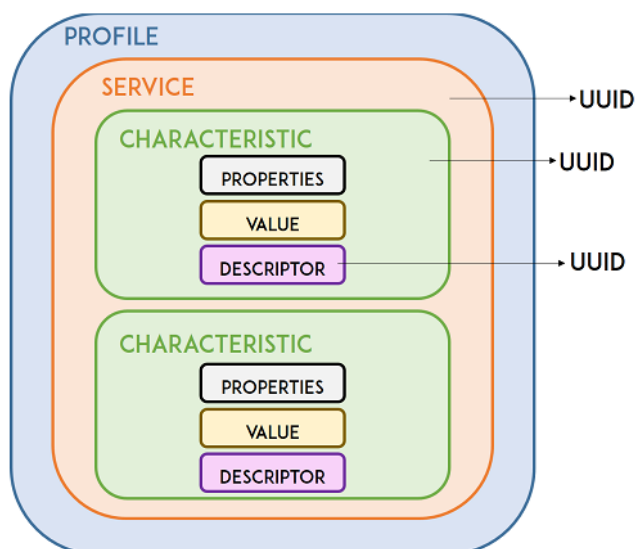
4.1.3 Vytvoření komunikce mezi moduly s Bluetooth Low Energy

U této komunikace bylo nutné rozhodnout, který modul bude serverem, a který pouze klientem. Předpoklad při rozhodování bývá, že server má data a klient pro ně přistupuje. Při vytvoření klienta z hlavního modulu a přístupu do vedlejšího modulu ESP32 by bylo nutné pokaždé skenovat okolí pro možné aktivní moduly. Tato metoda je nepřijatelná z důvodu využití BLE skenu na hlavním modulu během chodu internetové stránky, což by znamenalo interference na anténě hlavního modulu a možný kolaps stránek a neschopnost po určitou dobu obsloužit uživatele. Z toho důvodu by bylo vhodné, aby hlavní modul byl serverem, který tyto hodnoty sdílí, a vedlejší modul byl klientem, který bude k těmto hodnotám přistupovat a přepisovat je.

Hlavní modul byl napsán jako BLE server, který využívá hierarchie GATT (Generic ATtribute). V této hierarchii se jako první nadefinuje UUID (univerzální unikátní identifikátor) pro vytvořený service (kolekce přenášených dat). Tento identifikátor se skládá z 16 bytů. Do service části se definují jednotlivé charakteristiky, což jsou prostory vyhrazené právě pro jednu přenášenou hodnotu, metadata (descriptor) o této hodnotě a způsob přenosu (čtení či zápis). Každá charakteristika má svůj vlastní identifikátor UUID.

V této práci byl serveru nastavený jeden service se svým UUID se čtyřmi charakteristikami. Těmto charakteristikám byly nastavené UUID a následně i descriptor. Po nastavení BLE parametrů jako je název a zpětné volání pro připojené či odpojené zařízení je nutné nadefinovat zpětná volání i pro jednotlivé měřené veličiny. Při změně hodnoty v charakteristice je zavolán obslužný program, který do globální proměnné vypíše nově obdržená data. Následně je BLE service zapnut a je zapsán do propagovaných kanálů.

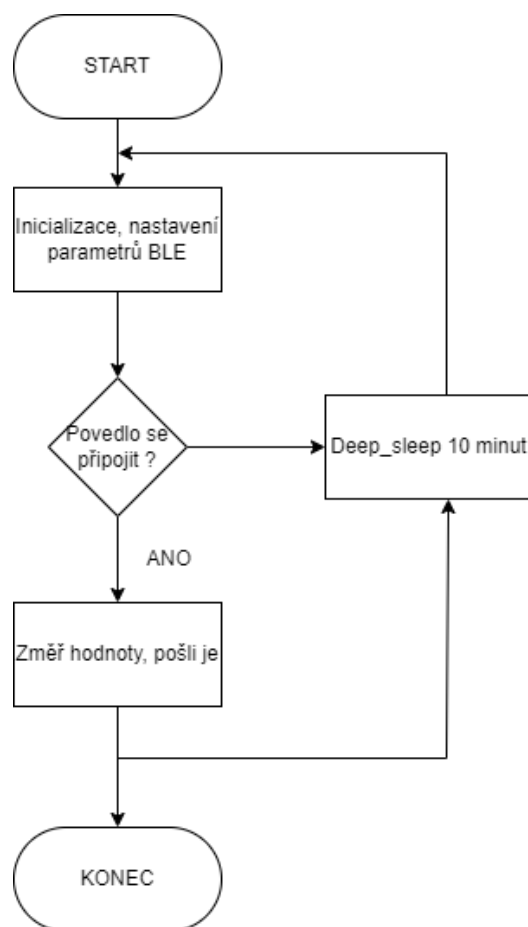
Při současné komunikaci přes Wi-Fi síť i BLE nastává problém se sdílenou anténou. Z toho důvodu dojde ke kolapsu BLE serveru a nastává problém, protože nejsme schopni obdržet nová naměřená data. Bylo provedeno několik pokusů o odstranění závady. Bylo vyzkoušené restartování propagace BLE serveru či změna parametrů BLE charakteristik. Tyto pokusy nedokázaly závadu, která se dostavila v náhodný čas, odstranit. Bylo zjištěno, že resetování hlavního modulu problém potlačí. Bohužel problém je stále přítomen, ale k závadě může opět dojít. V takovém případě je nutné modul opět restartovat. Podmínka o rozhodování restartu tkví v tom, že když se po určitém času nebude ani jedna veličina změněna, tak tento restart nastane.



Obrázek 4-4 - Struktura GATT [48]

4.2 Program ESP32 – vedlejší modul

Program pro tento modul byl vytvořen, aby měl co nejmenší spotřebu kvůli skutečnosti, že je napájen z baterie. Po spuštění programu dochází k inicializaci mikrokontroléru. Následně jsou nahrány parametry Bluetooth Low Energy hlavního modulu jako je adresa, UUID service část, v které jsou definovány UUID pro jednotlivé charakteristiky měřených veličin. V setup části je následně inicializováno samotné BLE. Následně se vedlejší modul pokusí podle nadefinovaných parametrů připojit k hlavnímu modulu a získat tak přístup k jeho charakteristikám. Pokud je toto připojení úspěšné a bylo ověřené, že charakteristiky se na hlavním modulu nalézají, dojde k následné inicializaci senzorů a sběrnice. Poté jsou změřeny veličiny, které jsou odeslány do hlavního modulu. Po vykonání tohoto procesu se vedlejší modul odpojí od navázané komunikace a program skočí do funkce, v které je mikrokontrolér uspán v režimu deep sleep na 10 minut. Pokud nedojde k připojení k hlavnímu modulu, přeskočí se část s měřením a odesíláním dat a modul skočí do funkce pro uspání. Funkce loop() je zde prázdná, protože po probuzení je celý program resetován. Vývojový diagram programu je zobrazen na obr. 4-5.



Obrázek 4-5 - Vývojový diagram programu vedlejšího modulu

5. VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT

V této kapitole budou zobrazeny naměřené hodnoty z obou modulů, kdy každý modul byl umístěn v jiné místnosti obytného domu. Hlavní modul byl umístěn v obývacím pokoji a vedlejší modul v kuchyni. Naměřené hodnoty budou analyzovány a porovnány s ideálními hodnotami, které by měli v místnostech dle norem být.

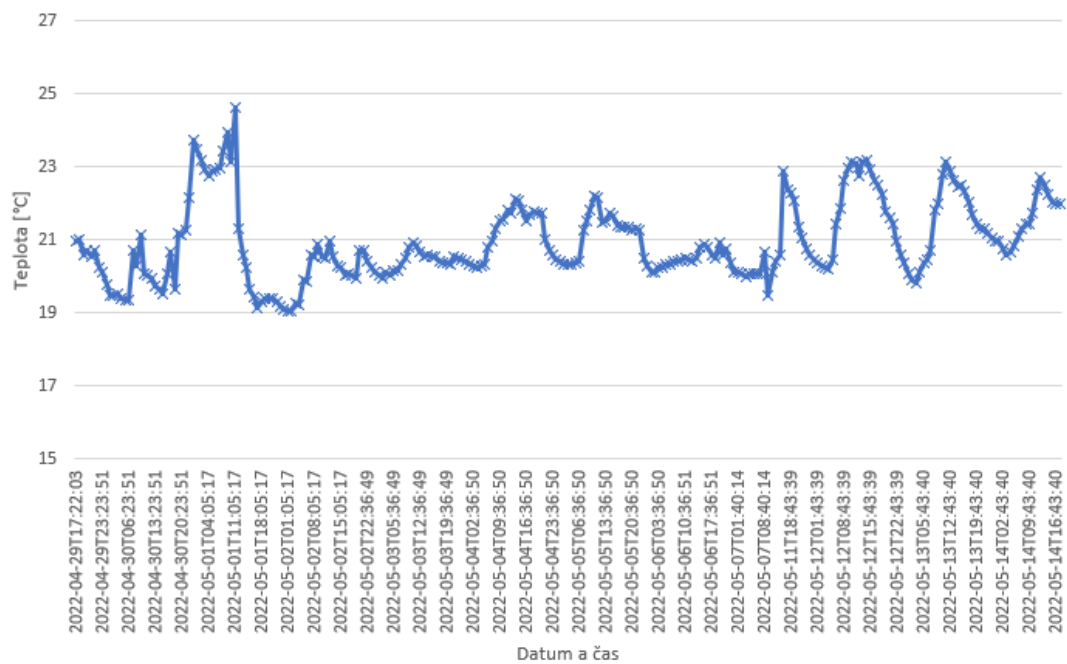
Naměřené hodnoty lze zpracovávat díky cloudové službě, kde je možnost veškerá data exportovat do počítače ve formátu CSV. Společnost, která provozuje cloudovou službu, je ze Spojených států amerických, a proto data je nutné přeformátovat na evropskou syntaxi, kde je nutné změnit oddělovací čárky na středníky a desetinné tečky na čárky. Po této úpravě lze s dokumentem pracovat v Excelu.

5.1 Teplota

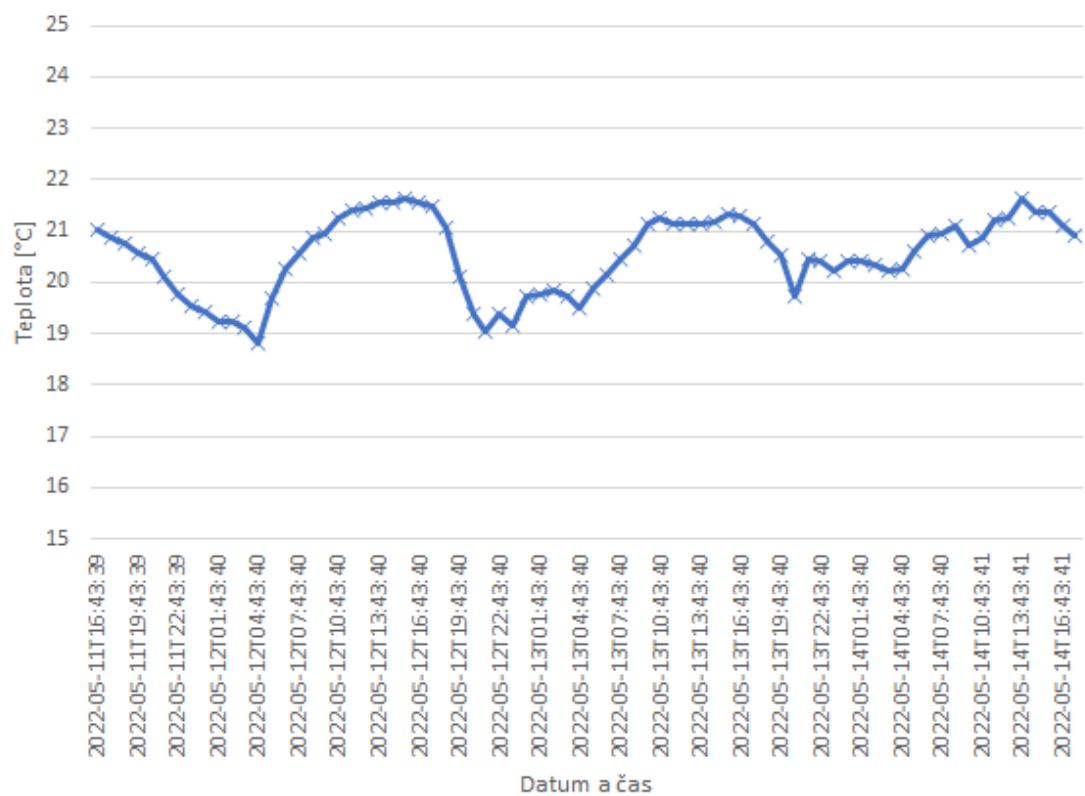
Teplota je důležitým parametrem, který dokáže uživateli pomoci převážně v zimních měsících, kdy je zapotřebí lepší kontroly teplot v jednotlivých místnostech pomocí optimalizace při nastavení ventilů u topení a samotného kotle. V letních měsících pak zase může sloužit pro nastavení klimatizace nebo pro analyzování nejlepší doby pro zavření oken, aby byl v domě co nejpříjemnější vzduch.

Teplota v domě má také vliv na lidskou psychiku a zdraví. Pokud je teplota příliš vysoká při spaní, tělo musí aktivovat mechanismus termoregulace a to způsobuje, že člověk spí lehkým neklidným spánkem a ráno není řádně odpočinutý. Na kvalitní spánek má ale vliv i příliš nízká teplota místnosti, protože přes noc se může člověk nachladit. Existují tedy optimální hodnoty pro teploty v jednotlivých místnostech, které se pohybují kolem 20 °C. V kuchyni by měla být teplota o stupeň nižší, protože při vaření se vlastně místnost vyhřívá. V ložnici by měla být teplota pro kvalitní spánek mezi 17 a 19 °C.

Při měření v obytném domě nebylo zapnuté topení s termostatem, a proto lze v grafech pozorovat kolísání teplot přes den a noc. Teplota se pohybovala standartně kolem 20 °C, nicméně u hlavního modulu lze vidět nárůst teploty až k 25 °C, která byla zaviněna nedostatečnou výměnou vzduchu mezi modulem a okolím. Tato skutečnost byla i důvodem proč byl později modul nalepen na vnější stranu krytu.



Obrázek 5-1 - Teplota naměřená hlavním modulem



Obrázek 5-2 - Teplota naměřená vedlejším modulem

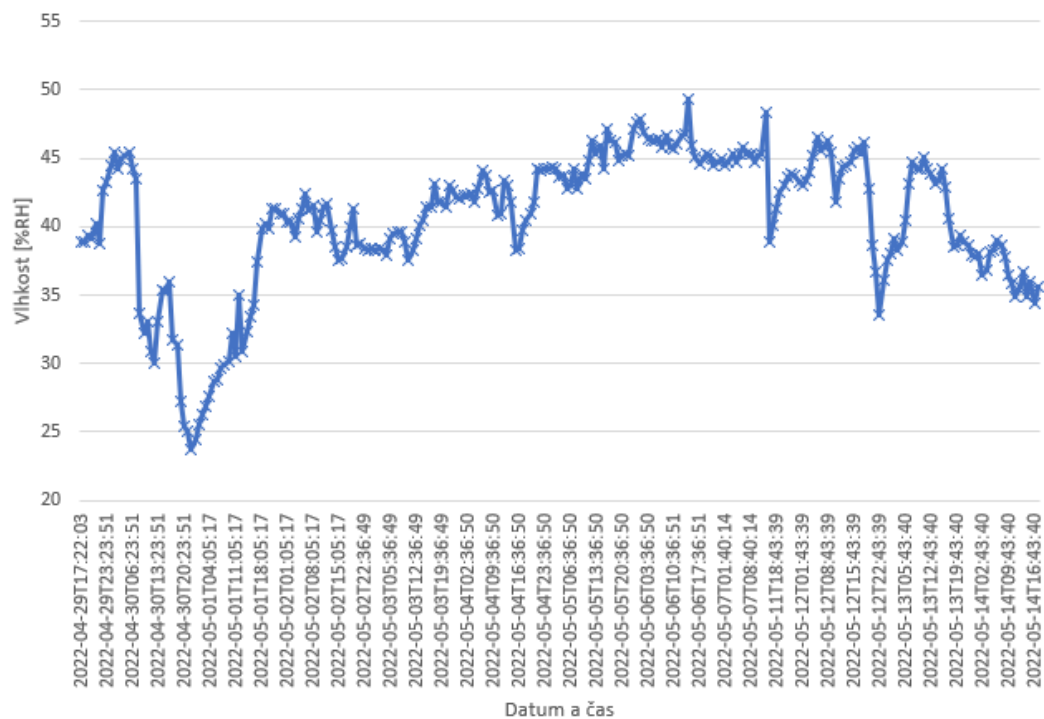
5.2 Vlhkost

Zjištění hodnoty vlhkosti v určitých prostorách může uživateli poskytnout cenné informace. Pokud ví, že v některém pokoji byla naměřena nízká vlhkost, může se u něho dostavit dráždění horních i dolních dýchacích cest. Krátkodobá nízká vlhkost nemusí představovat zdravotní riziko, ale pokud se jedná o dlouhodobou nízkou vlhkost, zdravotní problémy na sebe nenechají dlouho čekat. V suchém prostředí se totiž lépe šíří alergenů a mikroorganismů, které mohou vést k oslabení lidského organismu. Kromě toho se u člověka můžou začít projevovat různé vyrážky, ekzémy nebo popraskaná kůže. Ohroženy jsou především malé děti, u kterých není jejich obranyschopnost ještě plně vyvinuta a při nízké vlhkosti je u nich větší výskyt laryngitidy.

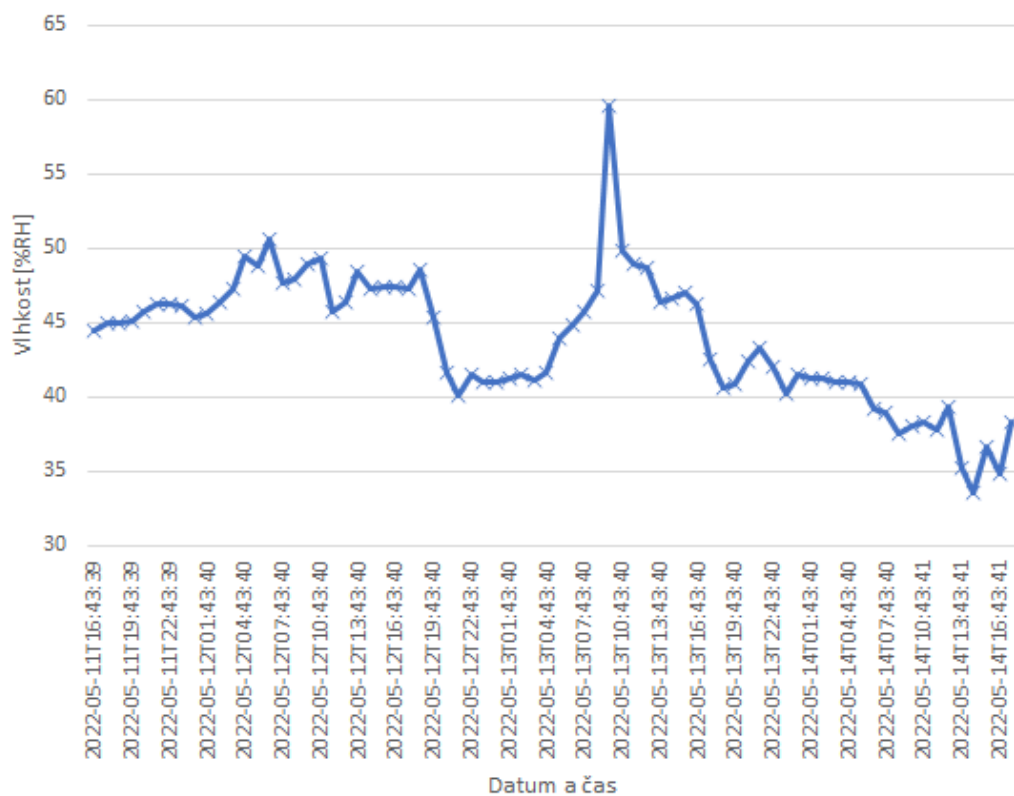
Na druhou stranu ani zvýšená vlhkost není pro zdraví dobrá. Při vysoké vlhkosti se lépe rozmnožují roztoči a plísně. I v tomto případě není velký problém při krátkodobém vystavení, ale zdravotní rizika přichází s dlouhodobým vystavením. V případě vysoké vlhkosti opět dochází ke snížení obranyschopnosti lidského těla, ale může dojít i ke vzniku alergií nebo astmatu. Opět platí, že nejvíce ohroženými jsou lidé se zdravotními problémy, děti a staří lidé. Vysoká vlhkost ale nezpůsobuje pouze zdravotní problémy, ale vzniklá plíseň může způsobit i nepříjemný zápach pokoje. Problém je i z ekonomického hlediska, protože převážně v zimě zapříčiňuje zvýšené tepelné ztráty, které vedou k vyšším nákladům za topení.

Hodnoty vlhkosti vzduchu se liší i podle typu místnosti, kdy vyšší hodnoty budou v koupelně a kuchyni. Naopak v ložnici či obývacích pokojích je zpravidla vlhkost menší. Optimální hodnota pro všechny místnosti se však pohybuje v rozmezí 40 % - 60 % relativní vlhkosti.

Při měření vlhkosti hlavního modulu byla také způsobena chyba měření kvůli chybě měření teploty, která je v tomto případě měřena pro matematickou kompenzaci v čidle. I se zahrnutím této chyby je možné vyčíst z grafů relativní vlhkost okolo 40 % RH, což je spodní hranice doporučené hodnoty. Kvůli výskytu nízké vlhkosti v měřených prostorách by bylo dobré do místnosti nainstalovat zvlhčovače vzduchu. Na vedlejším modulu lze místy zaznamenat velkou vlhkost, která byla zapříčiněna zvýšenými výpary při vaření.



Obrázek 5-3 - Vlhkost naměřená hlavním modulem



Obrázek 5-4 - Vlhkost měřená vedlejším modulem

5.3 Tlak

Tlak vzduchu ovlivňuje zdravotní i psychický stav člověka. Vyšší atmosférický tlak má na zdravého jedince spíše pozitivní vliv, protože se cítí plný energie, lépe se soustředí a je i výkonnější. Zdravotní problémy při vysokém tlaku postihují převážně seniory, astmatiky a kardiaky. Ti mohou mít pocit, že se jim hůře dýchá, jsou nesoustředění a mají i problém s vykonáním běžné práce. U většiny lidí však větší zdravotní problémy způsobuje změna tlaku než samotná hodnota tlaku. Čím rychlejší a významnější tato změna je, tím větší zátěž představuje pro lidský systém a také psychiku. Při snížení atmosférického tlaku může jedinec pociťovat bolesti hlavy, závratě a také bolesti kloubů. Pokud se atmosférický tlak naopak zvýší, může se u člověka objevit krvácení z nosu. Výhodou této citlivosti může být schopnost předpovídat počasí, protože nízký tlak ve většině případů souvisí s příchodem deště a vysoký tlak většinou znamená slunečné počasí. Díky znalosti atmosférického tlaku a jeho změn je uživatel schopen předpovědět počasí a může se s dostatečným předstihem připravit. Příkladem může být i věšení prádla, kdy, pokud bude tlak nízký, si uživatel raději prádlo pověsí doma, než aby ho pověsil ven. Jedinec citlivější na změny tlaku je tak upozorněn, že by si měl dávat větší pozor například na pocity závratí.

Senzory měří pouze absolutní tlak, a ne atmosférický tlak vztažený k hladině oceánu, který je nejčastěji udáván. Tento tlak však lze výpočtem převést na požadovaný atmosférický. Při přepočtu je nutné uvažovat teplotu, která byla v této práci naměřena senzorem HTU21D, a proto se zde může promítnout určitá chyba, která byla uvedena v kapitole o měření teploty.

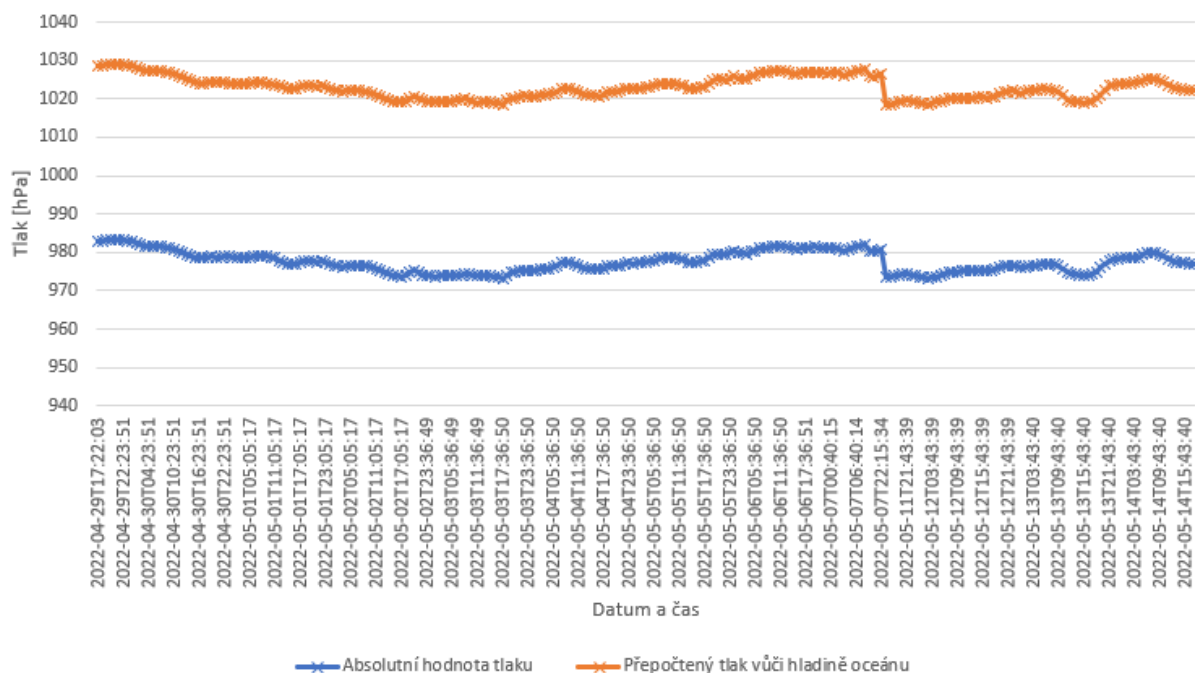
$$P_0 = P_a * \left(1 - \frac{0,0065 * h}{T + 273,15 + 0,0065 * h}\right)^{-5,257} \quad (5.1)$$

P_0 – Tlak vztažený na hladinu moře

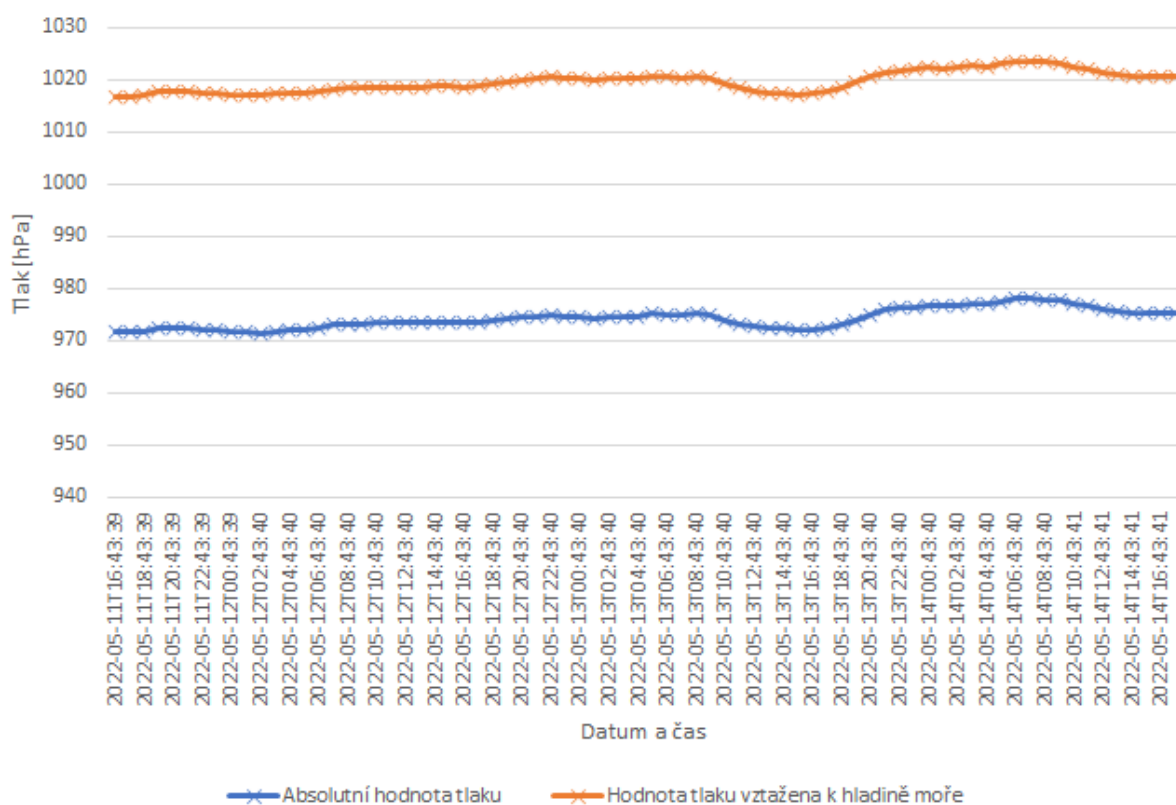
P_a – Absolutní hodnota tlaku působící na senzor

T – Teplota

h – Výška, ve které senzor měří od hladiny moře



Obrázek 5-5 - Tlak naměřený hlavním modulem s přepočtem k hladině moře

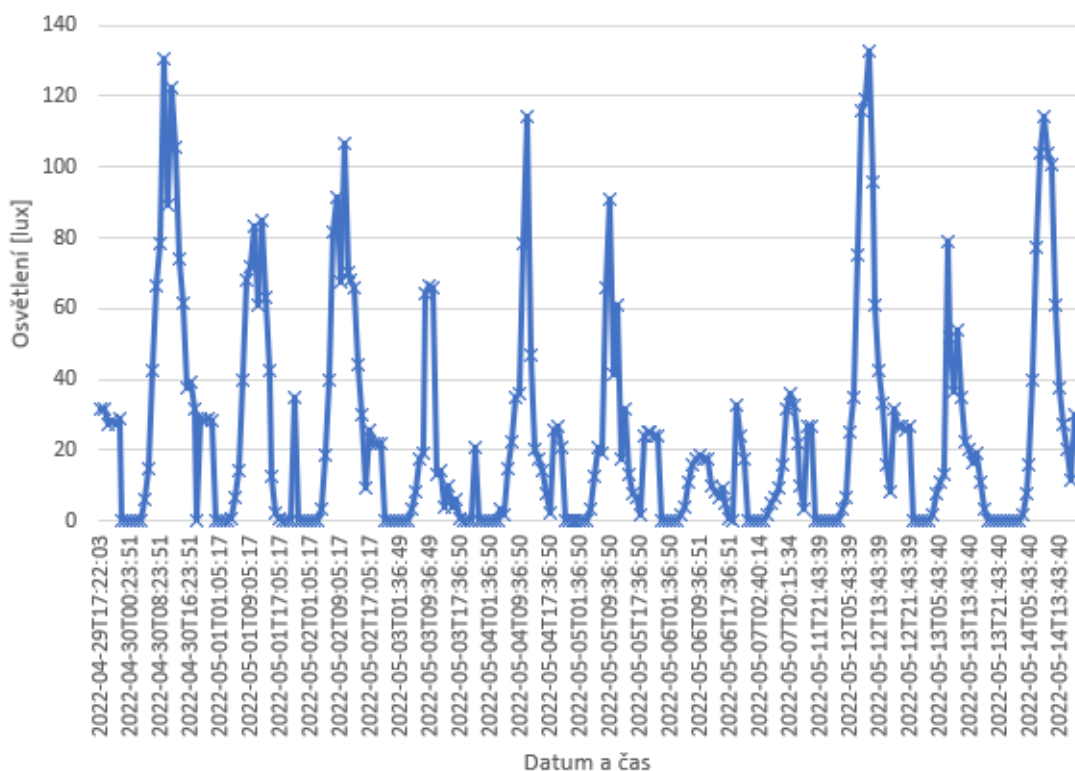


Obrázek 5-6 - Tlak naměřený vedlejším modulem s přepočtem k hladině moře

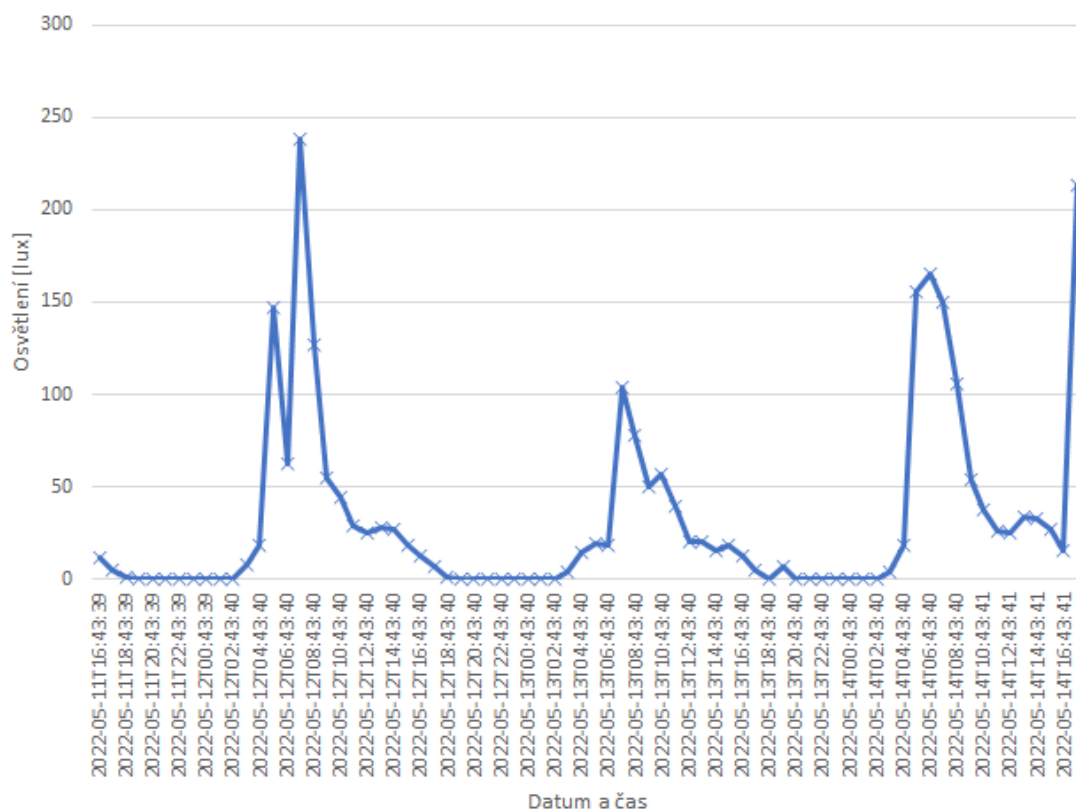
5.4 Osvětlení

Měření osvětlení místnosti bylo nainstalováno do zařízení pro lepší přehled o stavu osvětlení v dané místnosti. To může mít pozitivní dopad na ekonomickou situaci uživatele, protože díky tomuto zařízení může mít lepší přehled o stavu světla v místnostech, a proto může ušetřit za elektřinu, pokud zhasne zapomenutá rozsvícená světla. Také umožní uživateli lepší přehled o nočních aktivních zdrojích světla, která mohou znamenat například, že jsou děti ještě vzhůru.

Z grafu lze zjistit čas východu i západu Slunce a také hodnotu osvětlení, kdy v nočních hodinách se drží na konstantní hodnotě. Tato hodnota znamená, že v místnosti je zapnuté nějaké světlo, a na základě jeho síly lze odvodit i jaké. Osvícení závisí na síle světla a vzdálenosti umístění modulu od zdroje. Následně lze vidět na senzoru nula, která značí noc s vypnutými zdroji světla.



Obrázek 5-7 - Osvětlení naměřené hlavním modulem

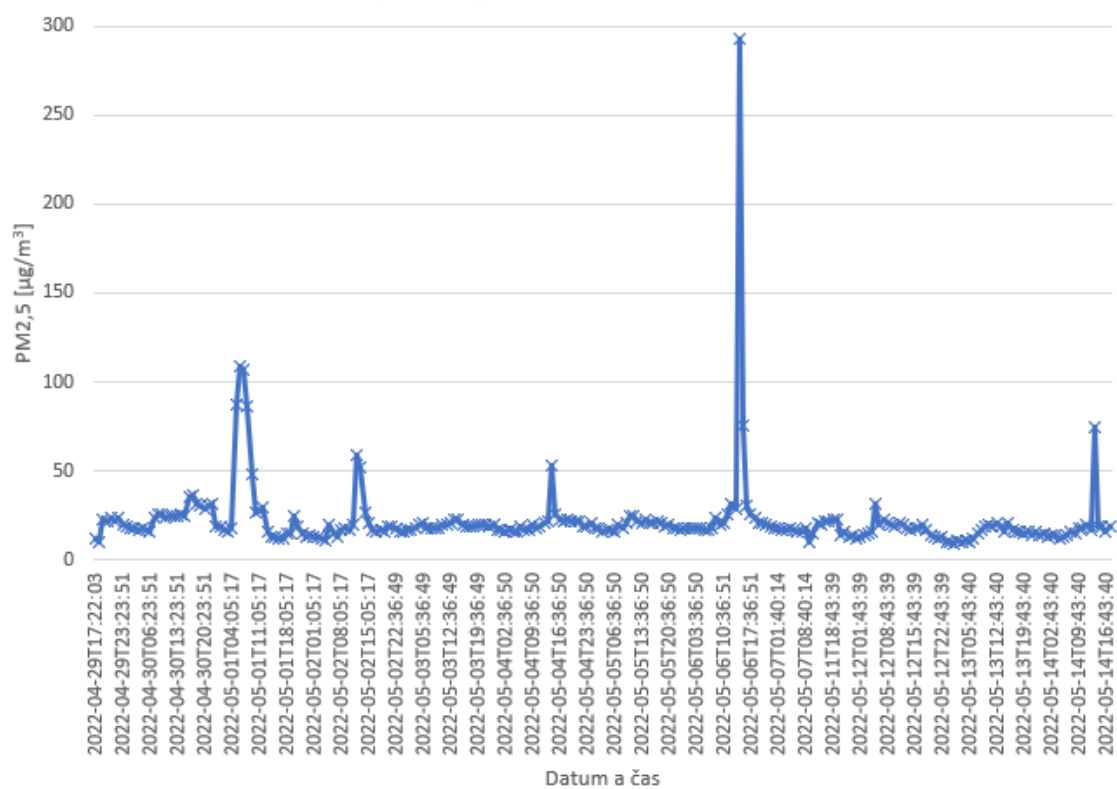


Obrázek 5-8 - Osvětlení naměřený vedlejším modulem

5.5 Pevné částice

Měření pevných částic je pro uživatele dalším důležitým faktorem. Pevnými částicemi může být pyl, saze, prach, popílek, ale také karcinogenní azbestová vlákna. Tyto částice mohou zapříčinit různé zdravotní komplikace. Zvýšené množství pevných částic ve vzduchu může při dlouhodobé inhalaci negativně ovlivnit kardiovaskulární systém a zkrátit délku života člověka. Vyšší množství pylu také představuje problém, a to převážně pro alergiky. Optimální hodnota této veličiny se pohybuje $0\text{--}30\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$, dle EAQI (European Air Quality Index).

Naměřené hodnoty v obytných místnostech se nejčastěji pohybují kolem $10\text{--}20\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$. Tato hodnota znamená, že místnost není příliš znečištěná a splňuje požadavky na komfortní bydlení. Na grafu lze vidět i velké výkyvy do řádů stovek. K tomuto jevu došlo kvůli pájení v blízkosti modulu. Senzor pro měření pevných částic je umístěn pouze na hlavním modulu.



Obrázek 5-9 - Pevné částice naměřené hlavním modulem

6. ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá konceptem zařízení pro monitorování ovzduší v domácnosti. Nejprve se probírá problematika mikrokontrolru a jeho výběru pro konkrétní aplikaci. Po zhodnocení všech aspektů jako jsou velikosti pamětí, integrované technologie či rychlost byl vybrán mikrokontrolér ESP32-WROVER-E pro centrální stanici. Tento mikrokontrolér má velké paměti až 12 MB, a proto je ideální pro vytváření webů. Velká rychlost 240 MHz na jádře zaručí i správnou obsluhu. Tento mikrokontrolér má v sobě integrované bezdrátové komunikace jako je Wi-Fi i Bluetooth. Jednotlivé typy bezdrátových komunikací byly srovnány a na základě požadavků byly navrženy pro určitou funkci v konstruovaném zařízení.

Pro monitorování ovzduší v domácnosti byly vybrány tyto veličiny teplota, vlhkost, tlak, osvětlení a pevné částice. Teplota byla zvolena pro lepší kontrolu teploty v místnostech. Další vybranou veličinou je vlhkost, kterou měříme v místnostech převážně pro kontrolu zdravotně nezávadného prostředí. Senzor pro měření obou veličin je HTU21D, který byl zvolen kvůli jeho malé chybě měření, jednoduchosti integrace a nízké ceně. Pro informace o nadcházejícím počasí a kvůli možnému výskytu zdravotních komplikací je měřen i tlak. Měření obstarává senzor BMP180, který za velmi malou cenu nabízí dobré výsledky. Z ekonomických důvodů je měřeno osvětlení místnosti, což obstarává senzor BH1750. Tento senzor kombinuje jednoduchost, malou cenu a přesné údaje. Poslední veličinou jsou pevné částice, které mohou způsobit i zkrácení života. Optický senzor PM1006 je velmi přesný a v podání VINDRIKTING od firmy IKEA vyjde levněji, než kdyby se koupil jako samostatný kus. Všechny senzory komunikují přes sběrnice I2C či UART. V této práci je rozebrána i problematika vyrobitelnosti DPS, ochranného krytu a finanční rozvaha celého projektu.

Programování mikrokontrolérů a webových stránek bylo zaměřeno na jednoduchost užívání a přívětivé vizuální prostředí. Naprogramována byla komunikace s domácím routerem přes Wi-Fi síť pro zobrazení naměřených výsledků, ke změně parametrů od uživatele a pro komunikaci s cloudovou službou ThingSpeak. Dále byla naprogramována vlastní Wi-Fi síť, aby bylo možné libovolně se připojit k jakékoliv síti v dosahu. Obě sítě jsou chráněné heslem, které nastavil uživatel. Dále byl naprogramován BLE server pro získání hodnot i z vedlejšího modulu. Nakonec je řešeno i zálohování naměřených dat na cloudové službě ThingSpeak.

Vedlejší modul je naprogramován pro co nejmenší spotřebu, a proto je po odeslání hodnot přes BLE hlavnímu modulu uspán.

Poslední kapitola se zaměřuje na otestování zařízení. Toto zařízení bylo testováno v různých místnostech a data, které byly měřené určitou dobu, byly vyhodnoceny a znázorněny ve formě grafu. Součástí bylo i vypsání možných rizik plynoucích z naměřené kvality ovzduší pro uživatele obývajících měřené prostory.

LITERATURA

- [1] Nordic Semiconductor. *nRF52840* [online]. [cit. 2021-12-4]. Dostupné z: <https://nsscprodmedia.blob.core.windows.net/prod/software-and-other-downloads/product-briefs/old-versions/nrf52840pbv20.pdf>
- [2] Espressif systems inc. *ESP32 Series* [online]. [cit. 2021-12-4]. Dostupné z: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf
- [3] Texas Instruments. *CC3235MODASF* [online]. [cit. 2021-12-4]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc3235modasf.pdf?ts=1638619684872>
- [4] NORDIC Semiconductors. *nRF52840* [online]. [cit. 29.11.2021]. Dostupné z: <https://www.nordicsemi.com/Products/nRF52840>
- [5] Grid connect, Inc. *ESP32-WROVER-E-Wi-Fi/BT/BLE* [online]. [cit. 29.11.2021]. Dostupné z: <https://www.gridconnect.com/products/esp32-wrover-e-module>
- [6] Texas Instruments. *CC3235MODASF* [online]. [cit. 29.11.2021]. Dostupné z: <https://www.ti.com/product/CC3235MODASF>
- [7] STEHLÍK, Petr. *Skriptování ESP8266* [online]. [cit. 2021-12-4]. Dostupné z: https://www.pstehlik.cz/prezent/ESP8266_a_ESP32.pdf
- [8] MINATEL, Pedro (Espressif systems). *Getting started with espressif's ecosystem* [přednáška]. Brno: VUT, 12.11.2021
- [9] PINKER, Jiří. *Mikroprocesory a mikropočítače*. Praha: BEN – technická literatura, 2004. ISBN 8073001101.
- [10] ŠTEFFAN, Pavel. *Paměťové obvody* [online]. Brno VUT 2019 [cit. 2021-12-4]. Dostupné z: https://moodle-archiv-2019-2020.ro.vutbr.cz/pluginfile.php/360857/mod_resource/content/1/MDIS08_pam%C4%9Bti.pdf
- [11] TechBook. *FLASH MEMORY: External buffer register* [online]. [cit. 4.12.2021] Dostupné z: <https://mgitecetek.wordpress.com/2011/07/23/flash-memory-external-buffer-register/amp/>
- [12] Actiontec. *The evolution of Wi-Fi standards: a look at 802.11a/b/g/n/ac/ax* [online]. [cit. 29.11.2021] Dostupné z: <https://www.actiontec.com/wifihelp/evolution-wi-fi-standards-look-802-11abgnac/>
- [13] DAŘÍLEK, Martin. *Standardy 802.11e a 802.11i* [online]. [cit. 4.12.2021] Dostupné z: http://www.cs.vsb.cz/grygarek/TPS/projekty/0506Z/tps_dar022.pdf
- [14] Digital Unite. *How to connect to wifi* [online]. [cit. 4.12.2021]. Dostupné z: <https://www.digitalunite.com/technology-guides/using-internet/connecting-internet/how-connect-wifi>
- [15] Bastlírna HW kitchen. *Jak je to s IP, MAC adresami a sítěmi* [online]. [cit. 29.11.2021]. Dostupné z: <https://bastlirna.hwkitchen.cz/jak-je-to-s-ip-a-mac-adresami>

- [16] MATOUŠEK, Petr. *Síťové aplikace a správa sítí* [online] Brno VUT-FIT [cit. 4.12.2021].
- [17] JERGA, Tomáš. *Vývoj technologie Bluetooth v moderních mobilních komunikačních zařízeních* [online] Ostrava 2015 [cit. 4.12.2021]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/94764618.pdf>
- [18] PUŽMANOVÁ, Rita. Bezpečnost bezdrátové komunikace: jak zabezpečit Wi-Fi, Bluetooth, GPRS či 3G. Brno: CP Books, 2005. ISBN 80-251-0791-4.
- [19] WIKIMEDIA COMMONS. *Bluetooth network topology* [online]. [cit. 29.11.2021]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bluetooth_network_topology.png
- [20] AFANEH, Mohammad. *A deep dive into BLE packets & events* [online]. [cit. 4.12.2021] Dostupné z: <https://www.novelbits.io/deep-dive-ble-packets-events/>
- [21] Ques10 (user: sayalibagwe). *Explain the frame format in Bluetooth technology* [online]. [cit. 29.11.2021]. Dostupné z: <https://www.quora.com/p/2706/explain-the-frame-format-in-bluetooth-technology-1/>
- [22] RF Wireless World. *BLE Protocol data unit* [online]. [cit. 29.11.2021]. Dostupné z: <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/BLE-Advertising-and-Data-Packet-Format.html>
- [23] TAJČ, Martin. NEDOMA, Jakub. DUDKA, Michal. *I2C – Relativně jednoduše* [online]. [cit. 26.12.2021]. Dostupné z: <http://www.tajned.cz/2016/10/i2c-relativne-jednoduse/?fbclid=IwAR0Dsb0ye13Q4skH-dVqeqLN4XhrMR8ydacIG0zKoNVSbnvAVWv7amV25WM>
- [24] ANALOG DEVICES. *I2C PRIMER: What is I2C? (Part 1)* [online]. [cit. 26.12.2021]. Dostupné z: <https://www.analog.com/en/technical-articles/i2c-primer-what-is-i2c-part-1.html>
- [25] TAJČ, Martin. NEDOMA, Jakub. DUDKA, Michal. *I2C – Relativně jednoduše* [online]. [cit. 26.12.2021]. Dostupné z: <http://www.tajned.cz/2016/10/i2c-relativne-jednoduse/?fbclid=IwAR0Dsb0ye13Q4skH-dVqeqLN4XhrMR8ydacIG0zKoNVSbnvAVWv7amV25WM>
- [26] HUBÁLEK, Jaromír. DRBOHLAVOVÁ, Jana. PRÁŠEK, Jan. BUŠINOVÁ, Petra. BENDOVIČ, Mária. *Mikrosenzory a mikroelektromechanické systémy*. Brno VUT 2012. [cit. 4.12.2021].
- [27] VOJÁČEK, Antonín. *Přehled principů el. Měření teploty – 1. díl* [online]. 24.6.2014 [cit. 4.12.2021]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/prehled-principu-el-mereni-teploty-1-dil>
- [28] GUILCOR. *Sonda PT100 a PT1000* [online]. [cit. 29.11.2021]. Dostupné z: <https://www.guilcor.cz/sonde-avec-raccord/3693-sonde-pt100-et-pt1000-avec-doigt-de-gants-plongeur-30-a-400mm.html>
- [29] REVIZEshop. *Metrel A 1128 -Sonda termočlánek K* [online]. [cit. 29.11.2021]. Dostupné z: <https://www.revizeshop.cz/Metrel-A1128-Sonda-termoclanek-K>
- [30] MICHNA, Vladimír. *Měření teploty – 2* [online]. [cit. 29.11.2021]. Dostupné z: <https://slidetodoc.com/men-teploty-2-zpracoval-vladimir-michna-pracovit-katedra/>

- [31] HANZAL, Josef. *Vlhkoměry* [online]. 10.1.2004 [cit. 4.12.2021] Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/vlhkomery.html-0>
- [32] Research Gate. *Structure of capacitive humidity sensor* [online]. [cit. 29.11.2021]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Structure-of-capacitive-humidity-sensor-Source-Reproduced-with-permission-from24_fig4_312326500
- [33] ROBOLABOR. *RESISTIVE HUMIDITY SENSOR HR202L* [online]. [cit. 29.11.2021]. Dostupné z: <https://robolabor.ee/en/sensors-and-accessories/417-resistive-humidity-sensor-hr202l.html>
- [34] DRATEK.CZ. *I2C Senzor teploty a vlhkosti HTU21D* [online]. [cit. 26.12.2021]. Dostupné z: <https://dratek.cz/docs/produkty/0/369/1484094054.pdf>
- [35] DRATEK.CZ. *I2C Senzor teploty a vlhkosti HTU21D* [online]. [cit. 26.12.2021]. Dostupné z: https://dratek.cz/arduino/1487-iic-i2c-senzor-teploty-a-vlhkosti-htu21d.html?gclid=Cj0KCQIAwqCOBhCdARIsAEPyW9nmB7KPgv5RSAPI-fmplrqJV07g8aaXar9LRfcDAk2u_-zXY1-y_rEaAp61EALw_wcB
- [36] DRATEK.CZ. *Měření intenzity světla BH1750* [online]. [cit. 26.12.2021]. Dostupné z: <https://dratek.cz/docs/produkty/0/465/1420672425.pdf>
- [37] DRATEK.CZ. *Měření intenzity světla BH1750* [online]. [cit. 26.12.2021]. Dostupné z: <https://dratek.cz/arduino/902-mereni-intenzity-svetla-bh1750.html>
- [38] DRATEK.CZ. *Měření tlaku BMP180* [online]. [cit. 26.12.2021]. Dostupné z: <https://dratek.cz/docs/produkty/1/1176/1500635990.pdf>
- [39] DRATEK.CZ. *Měření tlaku BMP180* [online]. [cit. 26.12.2021]. Dostupné z: <https://dratek.cz/arduino/838-mereni-tlaku-bmp180.html>
- [40] TME.CZ. *foliový tenzometr TFS10/120-P TENMEX* [online]. [cit. 9.4.2022]. Dostupné z: https://www.tme.eu/cz/details/ten-tfs10_120-p/dotykovaci-cidla/tenmex/tfs10-120-p/
- [41] Wikipedia.org. *Pevné částice* [online]. [cit. 9.4.2022]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Pevn%C3%A9_%C4%8D%C3%A1stice
- [42] TEXAS INSTRUMENTS. *RTC BQ32002D* [online]. [cit. 10.4.2022]. Dostupné z: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq32002.pdf?ts=1649534652430&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F
- [43] MAXIM INTEGRATED. *RTC DS3231MZ* [online]. [cit. 10.4.2022]. Dostupné z: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS3231M.pdf>
- [44] HOŘČICA, Adam. *Analýza a reverzní inženýrství produktu VINDRIKTING* [online]. [cit. 21.4.2022]. Dostupné z: <https://twitter.com/horcicaa/status/1415291684569632768?lang=cs>
- [45] JDS COMPANY KOREA. *LED Particle Senzor* [online]. [cit. 17.5.2022]. Dostupné z: <https://pdf.directindustry.com/pdf/cubic-sensor-instrument-co-ltd/pm1006k-led-particle-sensor-module/54752-927719.html>
- [46] TWILIO Electric-Imp. *UART Explained* [online]. [cit. 17.5.2022]. Dostupné z: <https://developer.electricimp.com/resources/uart>

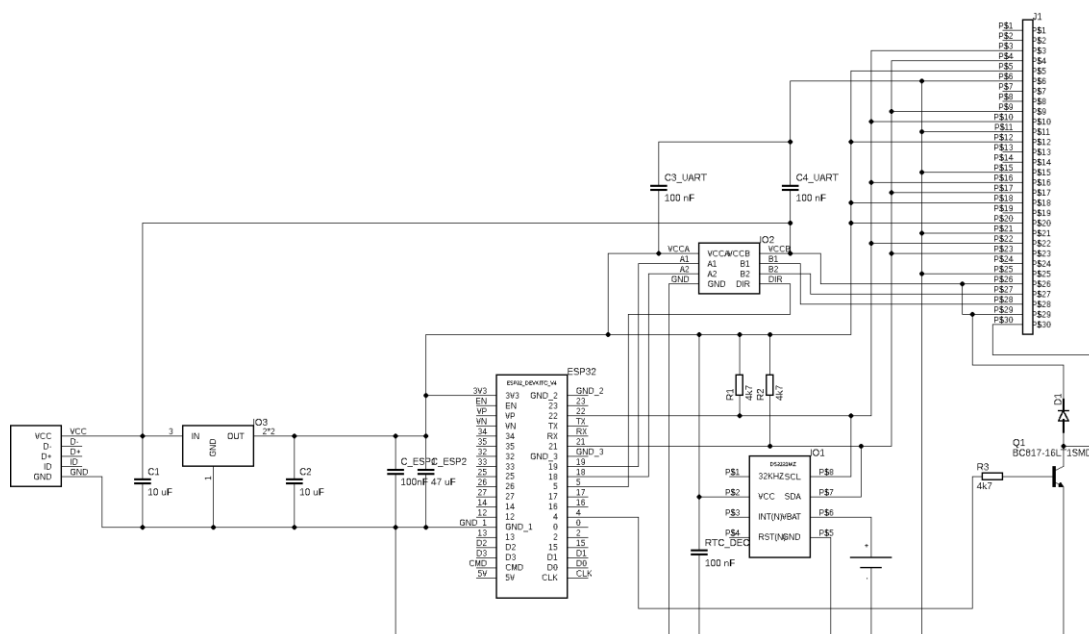
- [47] Last Minute ENGINEERS. *Insight into ESP32 Sleep Modes & their power consumption* [online]. [cit. 18.5.2022]. Dostupné z:
<https://lastminuteengineers.com/esp32-sleep-modes-power-consumption/>
- [48] Electro Rules. Getting started with ESP32 Bluetooth Low Energy (BLE) on Arduino IDE [online]. [cit. 23.5.2022]. Dostupné z:
<https://www.electrorules.com/getting-started-with-esp32-bluetooth-low-energy-ble-on-arduino-ide/>

SEZNAM PŘÍLOH

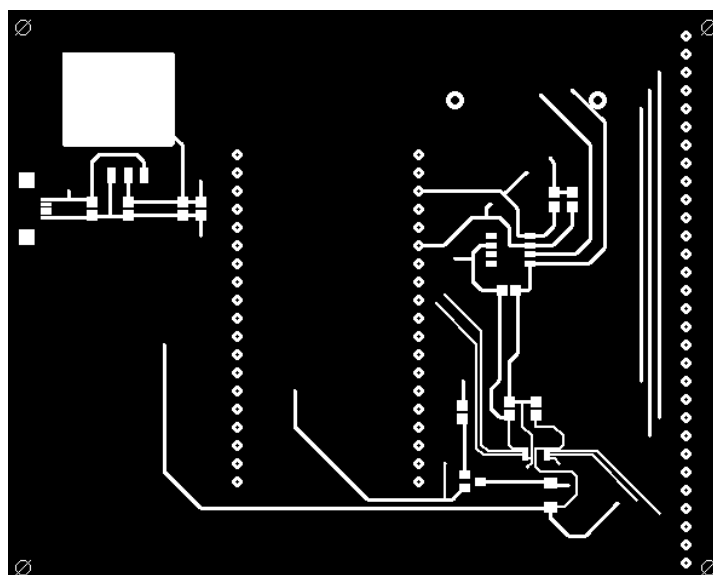
PŘÍLOHA A - DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ	75
PŘÍLOHA B - OBSLUŽNÉ PROGRAMY MODULŮ	80

Příloha A - Desky plošných spojů

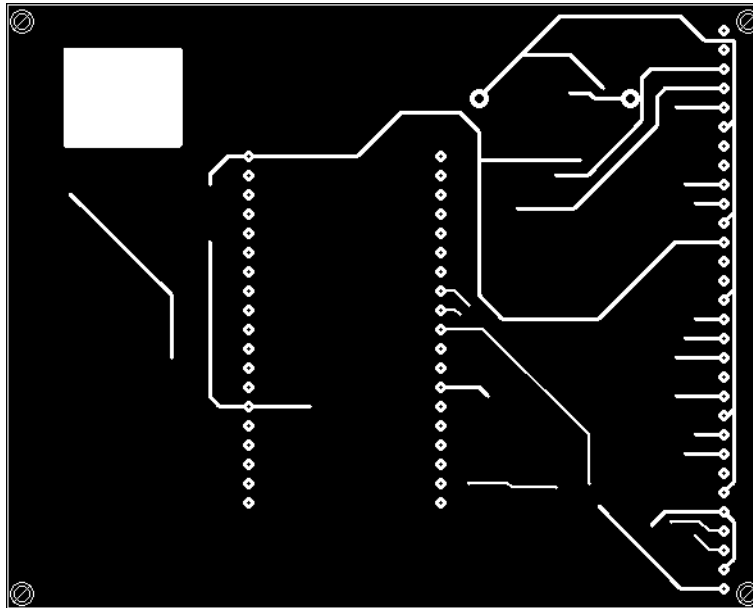
A.1 Hlavní modul – schéma



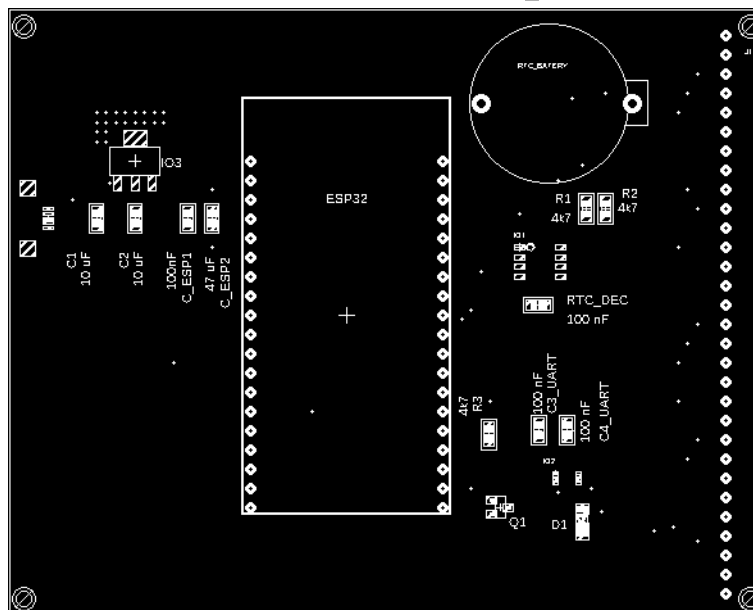
A.2 Hlavní modul – TOP strana



A.3 Hlavní modul – BOTTOM strana



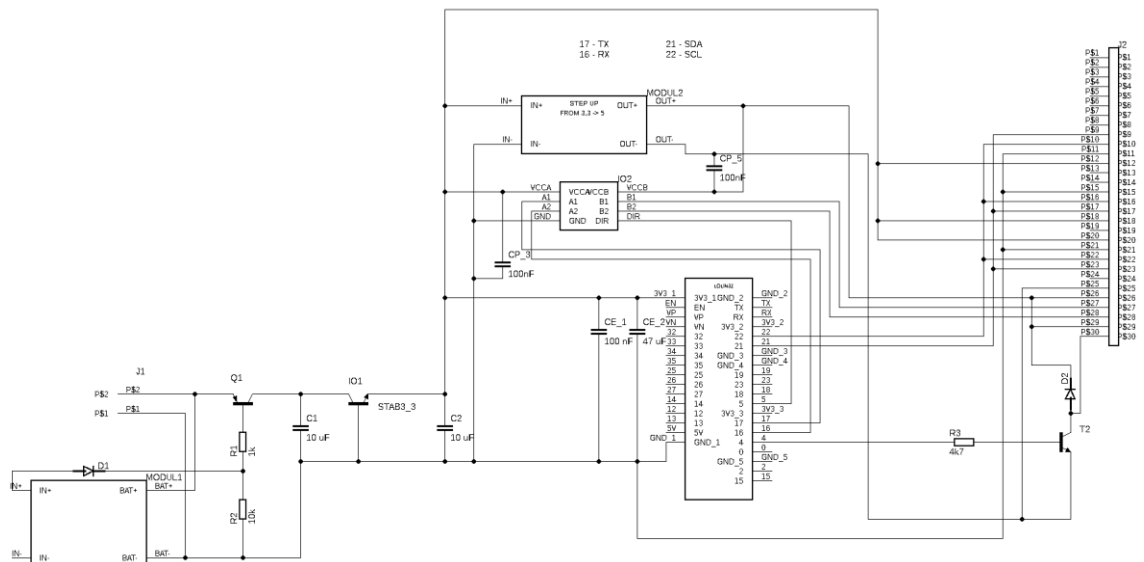
A.4 Hlavní modul – osazovací plán



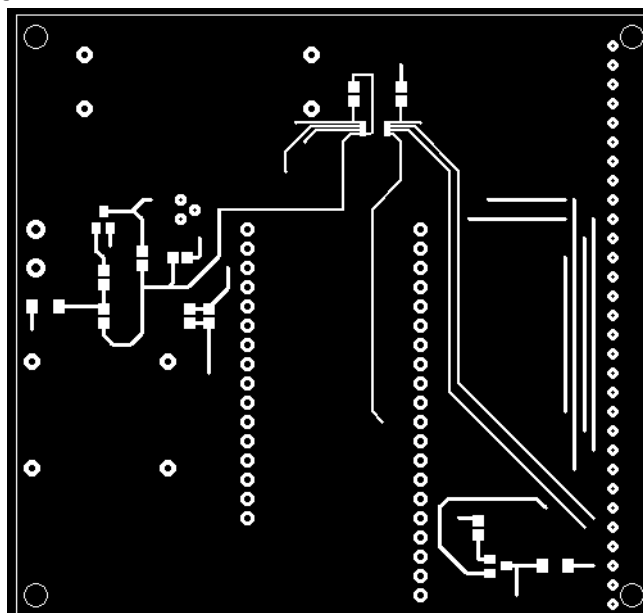
A.5 Hlavní modul – Seznam použitých součástek

Označení	Hodnota/typ	Pouzdro	Popis
C1, C2	10 uF	C0805	SMD kondenzátor
C3_UART, C4_UART, C_ESP1, RTC_DEC	100 nF	C0805	SMD kondenzátor
C_ESP2	47 uF	C0805	SMD kondenzátor
D1	1N4007	SOD80C	SMD dioda
IO3		SOT223	SMD zdroj 3,3V
Q1	BC817-16LT1SMD	SOT23-BEC	SMD tranzistor
R1, R2, R3	4k7	R0805	SMD rezistor
IO1	RTC DS3231mz	SO8	SMD RTC obvod
ESP32	ESP32_DEVKIT_C	Rozteč vývodů 2,54 mm, přes osu 25,4 mm	Mikrokontrolér
VCC_IN		Micro USB B	Konektor pro vstupní napájení
J1		Rozteč vývodů 2,54 mm	Výstupní konektor na senzory
RTC_Battery		Battery holder 2032	Držák baterie CR2032 do DPS
IO2		VSSOP8	SMD převodník log. Úrovní

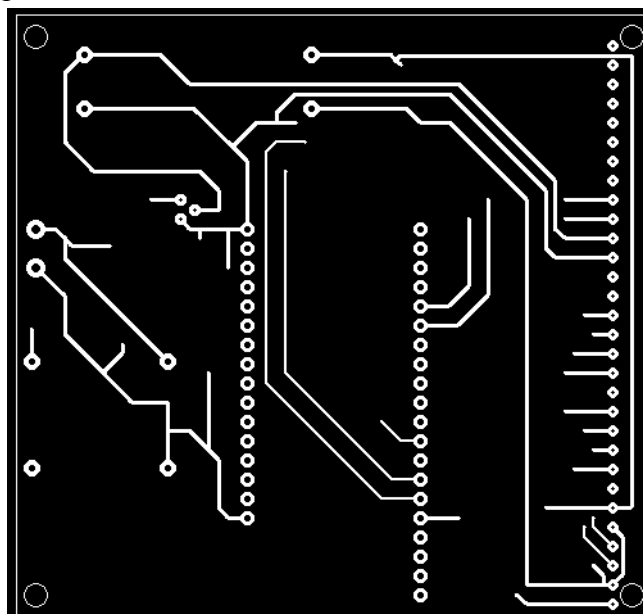
A.6 Vedlejší modul – Schéma



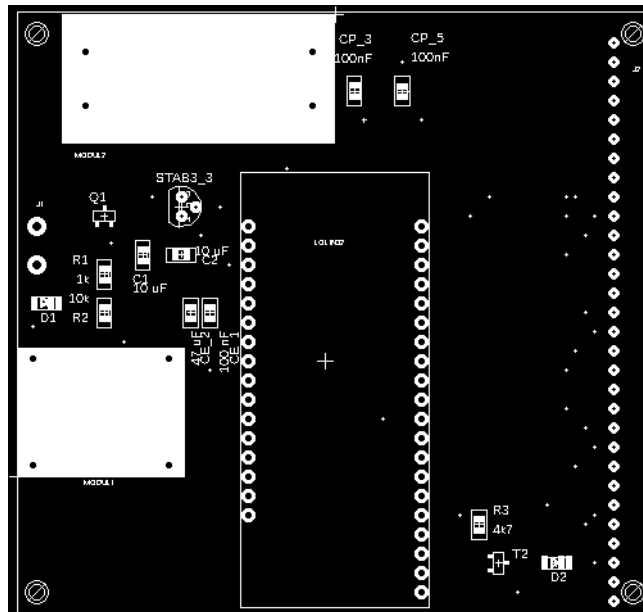
A.7 Vedlejší modul – TOP strana



A.8 Vedlejší modul – BOTTOM strana



A.9 Vedlejší modul – Osazovací plán



A.10 Vedlejší modul – Seznam použitých součástek

Part	Value	Package	Popis
C1, C2	10 uF	C0805	SMD kondenzátor
CE_1, CP_3, CP_5	100 nF	C0805	SMD kondenzátor
CE_2	47 uF	C0805	SMD kondenzátor
D1	BAT42	SOD80C	SMD schottkyho dioda
D2	1N4007	SOD80C	SMD dioda
Q1	BC807-16LT1SMD	SOT23-BEC	SMD tranzistor
R1	1k	R0805	SMD rezistor
R2	10k	R0805	SMD rezistor
R3	4k7	R0805	SMD rezistor
IO1		TO92	THT stabilizátor na 3,3 V
T2	BC817-16LT1SMD	SOT23-BEC	SMD tranzistor
MODUL1		20x17mm	Modul pro nabíjení Li-Ion baterií
MODUL2		36x17 mm	Step-up modul 2-28 V
LOLIN32		Rozteč vývodů 2,54mm, přes osu 22,86 mm	Mikrokontrolér
J2		Rozteč vývodu 2,54 mm	Výstupní konektor na senzory
IO2		VSSOP8	SMD převodník log. Úrovní
J1		Rozteč vývodů 5,08mm	Konektor na baterií

Příloha B - Obslužné programy modulů

Tyto programy byly přiložené v dodaném ZIP souboru v elektronické podobě a na CD v případě deskového výtisku.