VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2022

Šimon Roubal

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

NÁVRH NOVÉHO IONTMETRU PRO VENKOVNÍ PROSTŘEDÍ

DESIGN OF A NEW ION COUNTER FOR THE NATURE ENVIRONMENT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — **Šimon Roubal**

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — **Ing. Zdeněk Roubal, Ph.D.**

SUPERVISOR

BRNO 2022

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Elektronika a komunikační technologie**

Ústav radioelektroniky

Student: Šimon Roubal ***ID:*** 221067

Ročník: 3 ***Akademický rok:*** 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Návrh nového iontmetru pro venkovní prostředí

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte řídicí modul k iontmetru a upravte mechanickou konstrukci iontmetru tak, aby vyhovovala požadavkům plně autonomního měření v přírodním prostředí. Řešení bude umožňovat ukládání naměřených dat na SD disk. Iontmeter určený pro výzkum bouřek bude provozován ve vlhkém prostředí jeskyní i na povrchu. Tyto okolnosti zohledněte ve vlastním návrhu modulu.

Pro navrženou řídicí jednotku navrhněte desku plošných spojů a realizujete ji. Navrhněte její konstrukci tak, aby odolávala zvýšené relativní vlhkosti okolního prostředí. Proměřte vlastnosti celého systému ve volné přírodě v lese, u vodopádů a dalších místech s vysokou vlhkostí.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] MANN, B. C pro mikrokontroléry. Praha: BEN - technická literatura, 2004.

[2] ROUBAL, Z. Nízkoúrovňová měření. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015.

Termín zadání: 11.2.2022 ***Termín odevzdání:*** 1.6.2022

Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Roubal, Ph.D.

doc. Ing. Lucie Hudcová, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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

Předmětem této bakalářské práce je realizace nové řídící desky do iontmetru vyvíjeného na UTEE. Iontmetr musí být schopen plně autonomního měření v přírodním prostředí. Tzn. co nejdelší provoz na bateriový zdroj a také dobrou odolnost vůči vnějším vlivům. Získaná data se budou zapisovat na SD kartu a také odesílat pomocí GSM sítě na IoT server.

Klíčová slova

Blesk, iont, aspirační kondenzátor, mikroprocesor, SD karta, komunikační modul SIM7000

Abstract

Subject of this bachelors thesis is an realization of new control board for iontmeter that is developed at UTEE. Iontmeter must be capable of fully autonomous measure in outside contitions. That means it has to be able to run on batery for a long time and has to be to resist outside weather conditions. Measured data will be saved on an SD card and also sent using GSM network to the IoT server.

Keywords

Lightning, ion, aspiration capacitor, microprocesor, SD card, comunication module SIM7000

Bibliografická citace

ROUBAL, Šimon. *Návrh nového iontmetru pro venkovní prostředí.* Brno, 2022. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/141520. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce Zdeněk Roubal.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	Šimon Roubal
VUT ID studenta:	221 067
Typ práce:	Bakalářská práce
Akademický rok:	2021/22
Téma závěrečné práce:	Návrh nového iontmetru pro venkovní prostředí

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: 1. června 2022 ----------

podpis autora

Poděkování

Chtěl bych poděkovat panu Ing. Zdeňku Roubalovi, Ph. D. za odborné vedení a cenné rady, které mi pomohly tuto práci zkompletovat.

V Brně dne: 1. června 2022 ----------

podpis autora

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK **9**

SEZNAM OBRÁZKŮ **11**

SEZNAM TABULEK **12**

ÚVOD **13**

1. GLOBÁLNÍ ELEKTRICKÝ OBVOD **14**

2. TEORIE BOUŘEK **15**

2.1 ELEKTRICKÝ NÁBOJ MRAKU 15
2.2 VZNIK BLESKU 15
2.3 TYPY BLESKŮ 16
2.4 NADOBLAČNÉ BLESKY 16
2.5 DETEKCE BLESKŮ 17
2.6 POUŽITÍ NOVĚ NAVRŽENÉHO IONTMETRU 18

3. VZDUŠNÉ IONTY **19**

3.1 ROZDĚLENÍ IONTŮ 19
3.2 PROCES VZNIKU IONTŮ 20
3.3 ZÁNIK IONTŮ 21
3.4 PŘÍČINY VZNIKU IONTŮ 21
3.5 KONCENTRACE IONTŮ DLE PROSTŘEDÍ 23
3.6 KONCENTRACE IONTŮ DLE OBDOBÍ 24

4. MĚŘENÍ VZDUŠNÝCH IONTŮ **25**

5. BLOKOVÉ SCHÉMA DIGITÁLNÍ ČÁSTI **27**

6. VÝBĚR MIKROPROCESORU **28**

7. ÚSPORNÉ MÓDY ESP32 ..... **29**

8. SD KARTY **30**

8.1 FYZICKÁ CHARAKTERISTIKA SD KARTY 30
8.2 VNITŘNÍ STRUKTURA SD KARTY 30
8.3 VELIKOSTNÍ STANDARTY SD KARET 32
8.4 SBĚRNICE SD KARET 33
8.5 ARCHITEKTURY PAMĚTÍ SD KARET 34
8.6 PRŮMYSLOVÉ SD KARTY 36
8.7 ZAPOJENÍ SD KARET 37

9. POUŽITÝ HARDWARE **39**

9.1 MCU ESP32 39
9.2 PRŮMYSLOVÁ SD KARTA APACER 40
9.3 ČTEČKA SD KARET 40
9.4 KOMUNIKAČNÍ MODUL SIM7000E 41
9.5 HODINY REÁLNÉHO ČASU DS3231 41
9.6 AD PŘEVODNÍK ADS1115 42

10. MĚŘENÍ PROUDOVÝCH NÁROKŮ SIM7000 43

11. NÁVRH DPS 45

12. NÁVRH OBSLUŽNÉHO SOFTWARU 46

12.1 NAVRŽENÉ FUNKCE 47
12.2 KOMUNIKACE S IONTMETREM 48
12.3 MĚŘENÍ IONTŮ 49

13. LADĚNÍ DESKY 50

13.1 CHYBY V NÁVRHU DESKY 50
13.2 PROBLÉMY S VÝPISEM SÉRIOVÉHO PORTU 51
13.3 RESETOVÁNÍ PROCESORU 51
13.4 MĚŘENÍ ODBĚRU 51
13.5 LADĚNÍ KOMUNIKACE S IONTMETREM 52
13.6 TESTOVÁNÍ KOMUNIKACE S IONTMETREM 53
13.7 MECHANICKÉ PROVEDENÍ NOVÉHO IONTMETRU 54

14. ZÁVĚR 56

LITERATURA 57

SEZNAM PŘÍLOH 63

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

CELDN	Central Europe Lightning Detection
LINET	Lightning Location Network
UV	ultrafialové záření
SS	stejnosměrný proud
AK	aspirační kondenzátor
UTEE	Ústav teoretické a experimentální elektroniky
AD	analogově digitální
UART	Universal asynchronous receiver-transmitter
SD	Secure Digital
GPS	Global Positioning System
GSM	Groupe Spécial Mobile
SRAM	Static Random Access Memory
RTC	Real Time Clock
ULP	Ultra Low Power
RAM	Random Access Memory
GPIO	General-purpose input/output
SPI	Serial Peripheral Interface
SDUC	Secure Digital Ultra Capacity
UHS	Ultra High Speed
SSD	Solid State Drive
SLC	Single Level Cell
MPC	Multi Level Cell
TLC	Triple Level Cell
QLC	Quad Level Cell
pSLC	pseudo Single Level Cell
S.M.A.R.T.	Self-Monitoring, Analysis, and Reporting Technology
IP	Ingress Protection
MCU	Micro Controler Unit
NC	Not Connected
PCB	Printed Circuit Board
IoT	Internet of Things
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
DPS	deska plošných spojů
HW	Hardware
USB	Universal Serial Bus
ADC	Analog Digital Converter

ESR	Ekvivalentní sériový odpor	

Symboly:

M	objemový průtok vzduchu	[$cm^3 \cdot s^{-1}$]
r_1	poloměr vnitřní elektrody	[m]
r_2	poloměr vnější elektrody	[m]
v_x	průměrná rychlost proudění vzduchu v AK	[$m \cdot s^{-1}$]
C_{AK}	kapacita válcového AK	[F]
L	délka AK	[m]
k_m	mezní pohyblivost iontů [$cm^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$]	
k	pohyblivost iontů [$cm^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$]	
ε_0	permitivita vakua ($\varepsilon_0 = 8{,}856 \cdot 10^{-12}$ F·m^{-1})	[$F \cdot m^{-1}$]
ε_r	relativní permitivita	[-]
U_{AK}	polarizační napětí AK	[V]
$I_{k<km}$	proud měřený pikoampérmetrem na AK	[A]
$I_{k\geq km}$	proud měřený pikoampérmetrem na AK	[A]
n	koncentrace lehkých vzdušných iontů [iontů·cm^{-3}]	
q	elementární náboj ($q = 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ C)	[C]
C_K	kapacita kompenzačního kondenzátoru	[F]
i	maximální měřený proudový odběr	[A]
t	čas zvýšené proudové zátěže	[s]
U_N	napájecí napětí	[V]
U_Z	napětí při zátěži	[V]

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1 Globální elektrický obvod, [5] 14
2.1 Proces vzniku blesku v čase, [7] 16
2.2 Martin Popek – Rudí skřítci, [8] 17
2.3 Systém detekce blesků CELDN, [9] 18
3.1 Proces ionizace, [15] 21
3.2 Vznik sekundárního kosmického záření, [18] 22
3.3 Koncentrace iontů dle měsíce a denní hodiny, [20] 24
4.1 Aspirační kondenzátor, [2] 25
5.1 Blokové schéma iontmetru (schéma původní části z [2]) 27
6.1 Vývojová deska IoT ESP-WROOM-32, [23] 28
8.1 Velikosti SD karet, [30] 30
8.2 Blokové schéma SD karty, [31] 31
8.3 Vnitřní struktura SD karty, [31] 31
8.4 Příklad karty se sběrnicí SD Express (vpravo), [36] 33
8.5 Architektury NAND flash pamětí v SD kartách, [39] 34
8.6 SLC, MLC, TLC a QLC architektury, [42] 35
8.7 Rozmístění jednotlivých kontaktů na SD kartách, [46] 37
9.1 Vývojová deska IoT ESP-WROOM-32, [23] 39
9.2 Průmyslová SD SLC karta Apacer Industrial 256MB, [51] 40
9.3 Čtečka SD, [52] 40
9.4 Komunikační modul SIM7000E, [53] 41
9.5 Hodiny reálného času DS3231, [54] 41
9.6 AD převodník ADS1115, [55] 42
10.1 Proudový odběr modulu SIM7000 při přihlašování do GMS sítě 43
10.2 Proudový odběr modulu SIM7000 při odesílání SMS do sítě GSM 43
11.1 Pohled na DPS z horní strany 45
12.1 Hlavní vývojový diagram 46
12.2 Nastavované parametry v konfiguračním souboru na SD kartě 47
12.3 Příklad zapsaných dat v textovém souboru 48
12.4 Vývojový diagram funkce measureIons() 49
13.1 Finální podoba řídící desky 50
13.2 Změřený pokles napětí 3,3 V procesoru ESP32 pod minimální mez 51
13.3 Ladění sériové komunikace s iontmetrem v monitorovacím programu Adama Ježka [57] 52
13.4 Testování komunikace s původní deskou iontmetru 53
13.5 vybraná krabička Kradex Z90JH ABS 54
13.6 Rozmístění desek plošných spojů - v krabici Kradex 55

SEZNAM TABULEK

3.1 Rozdělení iontů dle Dr. Horraka, [2] 19
3.2 Velikost ionizační energie pro vybrané atomy plynů, [14] 20
3.3 Koncentrace iontů ve vzduchu dle prostředí, [17] 23
7.1 Úsporné módy ESP32, [25] [26] 29
8.1 Hlavní registry SD karty, [32] [33] 32
8.2 Velikostní třídy SD karet, [34] 32
8.3 Typy architektur NAND flash pamětí, [38] [39] [41] 35
8.4 Rozložení jednotlivých kontaktů a jejich příslušné připojení na sběrnici SPI, [47] [48] 37
8.5 Popis funkcí jednotlivých pinů na standartní velikosti SD karty, [31] 38
9.1 Parametry vývojové desky IoT ESP-WROOM-32, [23] 39
12.1 Vytvořené funkce 47
12.2 Komunikační protokol iontmetru, [3] 48

Úvod

Fenomén vzdušných iontů je velice zajímavou, a ne zcela probádanou oblastí. Nejprve se zkoumal pro objasnění kosmického záření a elektrického pole země, významným českým odborníkem v této oblasti byl akademik František Běhounek [1]. V druhé polovině dvacátého století vstoupil do popředí vliv vzdušných iontů na lidské zdraví. Význačným českým vědcem, který se věnoval vlivu vzdušných iontů na lidské zdraví v uzavřených prostorách byl Ing. Zdeněk Buřival, CSc. Na státním zdravotním ústavu v Praze pak doktorka Mudr. Ariana Lajčíková CSc.

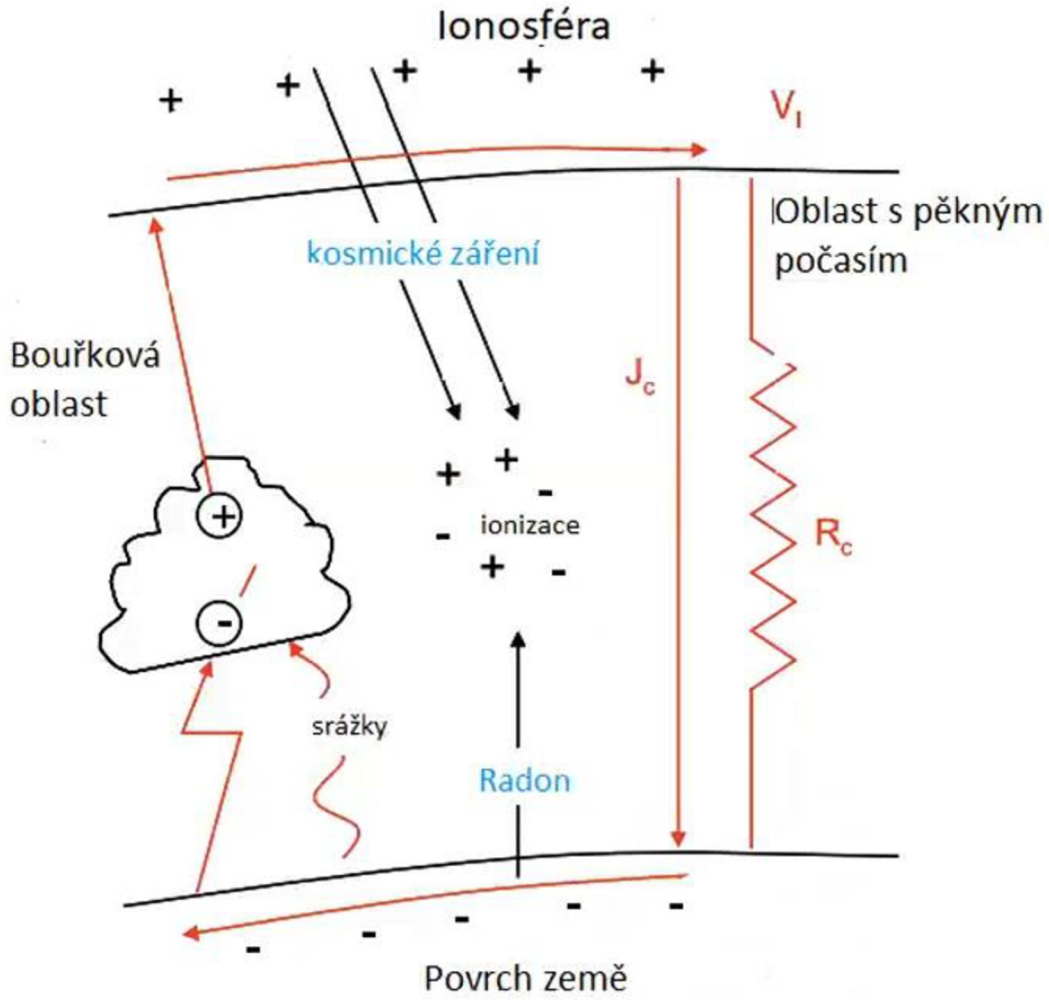
Tato práce se však zabývá trochu jinou oblastí, a to konkrétně měřením koncentrací vzdušných iontů ve venkovním prostředí při výskytu bouřek, jelikož právě bouřky jsou jedním z hlavních zdrojů ionizace ovzduší na Zemi. Fenoménem blesků se v česku na Akademii věd zabývá kupříkladu Ing. Ivana Kolmašová, Ph.D. I bouřky, respektive blesky, jsou také relativně neprobádanou oblastí, kde není naprosto jasné, jak vznikají a kde tedy existuje více teorií.

Cílem této práce je návrh a realizace nové řídící desky pro iontmetr vyvíjený na Ústavu teoretické a experimentální elektroniky. Nová řídící deska bude působit jako datalogger a změřené zapisovat na SD kartu a také posílat pomocí IoT sítí na vzdálený server. Práce tematicky navazuje na disertační práci Ing. Zdeňka Roubala Ph.D. [2] a diplomovou práci Ing. Václava Kadlčka [3], kteří se spolu s Ing. Zoltánem Szabó Ph.D. na předchozím vývoji iontmetru podíleli a také na dlouhodobou vědeckou práci dalších členů Ústavu teoretické a experimentální elektrotechniky [4].

1. GLOBÁLNÍ ELEKTRICKÝ OBVOD

Globální elektrický obvod planety Země je tvořen potenciálovým rozdílem asi 250 kV mezi záporně nabitým povrchem Země a kladně nabitou ionosférou. Zemi si lze tedy představit jako jakýsi velký kulový kondenzátor kdy elektrodami jsou Země a ionosféra a dielektrikum představuje vzduch mezi nimi. Samotná planeta pak drží náboj o velikosti cca 500kC. Díky rozdílu potenciálů se v atmosféře vyskytuje elektrické pole. Jeho intenzita se pohybuje okolo 100 – 150V/m ve výšce 1 m nad povrchem Země při hezkém počasí. Toto pole je však nehomogenní, jelikož závisí na počasí (aktuální ionizaci ovzduší) a také na geografických podmínkách (hory, lesy, stožáry…) [5] [6].

K nabíjení země dochází zejména díky bouřkovým mrakům, ve kterých se odděluje kladný a záporný náboj. K vybíjení naopak dochází za hezkého počasí přes odpor vzduchu. Tyto děje globálního obvodu země mají také velký vliv na ionizaci ovzduší [5].



Obrázek 1.1 Globální elektrický obvod, [5]

2. TEORIE BOUŘEK

Bouřky jsou jedním z hlavních zdrojů ionizace v naší atmosféře. Jejich fenomén je do dnes ne zcela probádaný. Není kupříkladu přesně jasné, jakým způsobem vznikají blesky.

2.1 Elektrický náboj mraku

V mraku se nachází velké množství různých částic jako kupříkladu částečky vody, sněhu a ledu, které v něm cirkulují. Dolů pomocí gravitace a nahoru pomocí proudů vzduchu. Prvotní náboj získají tyto částice pomocí kosmického záření či radonu vylučovaného z litosféry. Tento náboj si pak dále předávají při zmíněné cirkulaci třením o sebe. Těžší částice se nabíjejí záporně a drží se ve spodní části mraku a lehčí se nabíjejí kladně a drží se v horní části mraku [7].

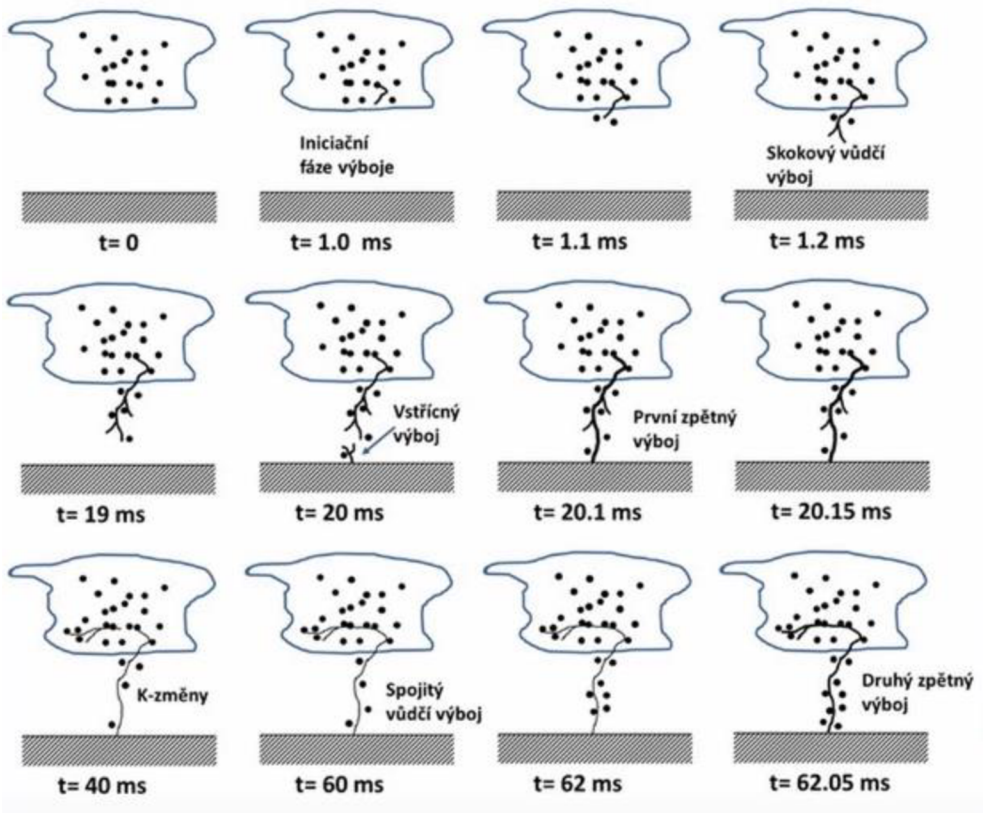
2.2 Vznik blesku

Ani dnes si nejsme jisti, jak přesně blesky vznikají, jelikož napětí mezi zónami jednotlivých oblastí náboje je cca desetkrát menší, než je průrazné napětí vzduchu. Pro vznik blesku existují tedy dvě teorie. Jedna z nich spočívá v předpokladu, že částečky ledu nejsou kulaté, ale mají špičku, na které může vzniknout koronový výboj, a tedy jakýsi zárodek pro vznik blesku. Druhá teorie spočívá ve srážení kosmického záření s atmosférou, kdy dojde ke vzniku vysokoenergetických ubíhajících elektronů, díky kterým dojde ke zvýšení vodivosti v bouřkovém mraku, a tudíž je zapotřebí menší průrazné napětí pro vznik blesku. Případně se zvažuje i kombinace obou variant [7].

Vzniklý výboj si posléze začne razit cestu dolů a ionizovat si cca 50m oblasti vzduchu pod sebou. Tento děj trvá asi 20ms. Takovémuto výboji se říká vůdčí. Proti vůdčímu výboji jde naproti výboj vstřícný, který vzejde z nějakého vyvýšeného a vodivého místa například stožáru vysokého napětí, vysílače či střechy domu. Při spojení těchto výbojů dojde ke vzniku blesku. Při dostatku náboje v mraku může jít vzniklým kanálem i několik výbojů za sebou [7].

Proud blesku desítky až stovky kA. Díky rychlému ohřevu vzduchu velkým proudem v bleskovém kanálu dojde k rychlému rozpínaní vzduchu, které způsobí hrom. Rychlost blesku dosahuje cca poloviny rychlosti světla [7].

Na obrázku níže je zobrazen vnik blesku v čase.



Obrázek 2.1 Proces vzniku blesku v čase, [7]

2.3 Typy blesků

Blesky mohou být typu oblak-oblak a oblak-země kdy blesky typu oblak-země mohou být buď kladné nebo záporné podle toho z jak nabité části mraku vzešly a blesky typu oblak-oblak mohou vzniknout vně jednoho oblaku anebo mezi různými oblaky [7].

2.4 Nadoblačné blesky

Kromě všeobecně známých blesků, které můžeme jednoduše pozorovat, existují také nedávno objevené blesky nadoblačné. Vznikají v ionosféře nad bouřkou. Dojde k nim při vytvoření nehomogenity náboje v ionosféře, kdy se proudem vzduchu dostane do ionosféry náboj z bouřkového mraku například nárazem do bouřky do velkého pohoří [7]. Typy nadoblačných blesků jsou:

- skřítci,
- elfové,
- modré výtrysky,
- obří výtrysky.

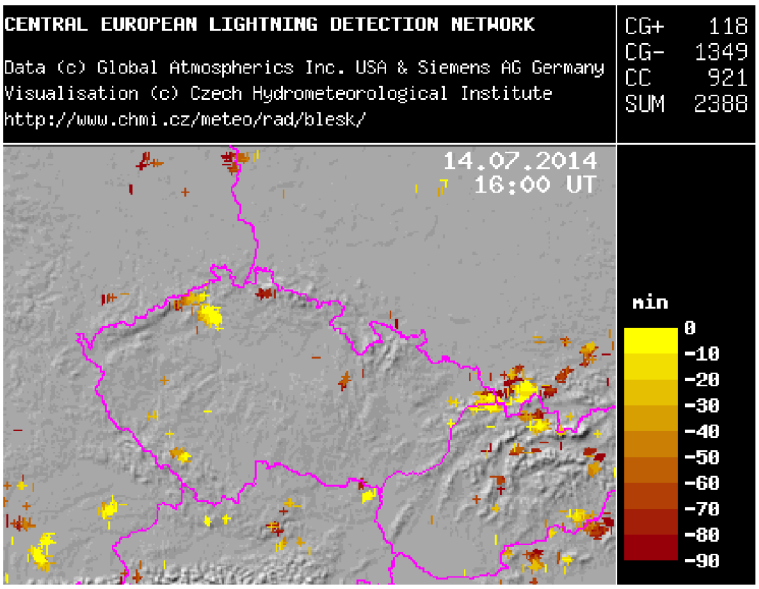
Jeden z typů nadoblačných blesků byl zachycen českým fotogramem Martinem Popkem. Jeho fotografie červených skřítků lze vidět níže.

Obrázek 2.2 Martin Popek – Rudí skřítci, [8]

2.5 Detekce blesků

Blesky detekujeme na základě elektromagnetických vln. Bleskový kanál působí jako anténa vysílající do prostoru mezi zemí a ionosférou ve které se vyzářený signál odráží jako ve vlnovodu. Nejsilnější složka je na frekvenci okolo 10kHz. Část výboje může být také odražena ve větší frekvenci po magnetické siločáře ven přes ionosféru na magneticky spřažené místo. Místo úderu blesku se pak určí pomocí sítě měřících bodů, kdy ke každé měřící stanici dojde elektromagnetický puls v jinou dobu, a právě podle rozdílů doby detekce se dopočte místo úderu blesku. Přesnost detekce tímto systémem je na stovky metrů [7]. Detekční systém je schopen určit i polaritu a sílu výboje blesku.

Na území ČR jsou provozovány dva systémy na detekci blesků. Jedním z nich je volně přístupný systém CELDN (Central Europe Lightning Detection) zapojený do celoevropské sítě. Druhým systémem je uzavřený LINET (Lightning Location Network) [9]. Do roku 2017 využíval Český hydrometeorologický ústav systém CELDN, nyní přešel na systém LINET [10].



Obrázek 2.3 Systém detekce blesků CELDN, [9]

2.6 Použití nově navrženého iontmetru

Nově navržený iontmetr by sledoval koncentraci lehkých vzdušných iontů v požadované oblasti, kde se předpokládá zvýšený výskyt bouřek. Předpokládá se současné měření intenzity elektrického pole Země pomocí přístroje „Electric field mill“ (rotační elektrostatický voltmetr). Získané údaje budou sloužit k zpřesnění popisu iontové rovnice vystupující v numerickém modelu bouřkového oblaku. Vzhledem k měření během bouřky bude nutné, aby navržený systém byl plně autonomní a voděodolný. Protože by kvůli výboji mohlo dojít ke ztrátě dat, tak se předpokládá i průběžné zasílání nejdůležitějších výsledků na webový server. Iontmetr bude pracovat ve dvojici, jeden pro záporné a druhý pro kladné lehké vzdušné ionty. Bude použita naprogramovaná měřicí sekvence, aby kromě koncentrace lehkých vzdušných iontů byla určena i jejich pohyblivost.

Mimo umístění na pevné pozici na zemi se uvažuje i měření na dronu před přicházející bouřkou (během bouřky je létání v oblaku zakázané). To umožní zjistit rozložení iontů a náboje během procesu vzniku a průběhu bouřky.

Kromě použití při výzkumu blesků se předpokládá i použití pro měření koncentrace lehkých vzdušných iontů v jeskyni, v interiérech budov a v přírodě v souladu s předcházejícím výzkumem [11]. Použitá koncepce je natolik univerzální, že jsou možné všechny předpokládané způsoby využití.

3. VZDUŠNÉ IONTY

Ionty jsou elektricky nabité částice (atomy, molekuly či uskupení atomů nebo molekul). Mají rozdílný počet celkový počet elektronů od celkového počtu protonů a dle převažujících částic mají buď kladný náboj anebo záporný náboj.

3.1 Rozdělení iontů

Ionty můžeme dělit podle několika faktorů. Nejpoužívanějším dělením je dělení podle náboje částice. Dále také dělíme podle hmotnosti částice a její pohyblivosti [2]. Podle náboje dělíme ionty na:

- kladné,
- záporné.

Kladný iont vzniká tak, že částice odevzdá jeden nebo více elektronů, v částici tedy převažují protony a získá kladný elektrický náboj. Vznik záporného iontu je podmíněn přijetím jednoho nebo více elektronů do částice ve které bude vetší množství elektronů než protonů a částice nabude náboj záporný.

Dalším dělením je dělení podle Dr. Horraka, kde jsou ionty roztřízeny podle hmotnosti, pohyblivosti v elektrickém poli a průměru.

Tabulka 3.1 Rozdělení iontů dle Dr. Horraka, [2]

Druh iontů	k [$cm^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$]	d [nm]
Těžké velké ionty	$0{,}0042 > k \geq 0{,}00041$	$22{,}0 < d \leq 79{,}0$
Lehké velké ionty	$0{,}074 > k \geq 0{,}0042$	$4{,}80 < d \leq 22{,}0$
Střední ionty	$0{,}500 > k \geq 0{,}074$	$1{,}60 < d \leq 4{,}80$
Velká seskupení iontů	$1{,}28 > k \geq 0{,}50$	$0{,}85 < d \leq 1{,}60$
Lehké ionty	$3{,}20 > k \geq 1{,}28$	$0{,}36 < d \leq 0{,}85$

Lehké ionty vzniknou spojením několika desítek molekul, mají vysokou pohyblivost a velmi malou životnost, a to jen několik sekund. Středně těžké ionty jsou shlukem již o něco větším, a to řádově stovky molekul. Jejich životnost je již v rozmezí několika stovek hodin. Posledním typem jsou ionty těžké, skládající se až z tisíců molekul a životností i několik týdnů. Často mívá jádro z částice prachu nebo kouře. Pohyblivost iontů se odvíjí od jejich hmotnosti nepřímo úměrně, tzn. že čím menší iont tím větší je jeho rychlost [12].

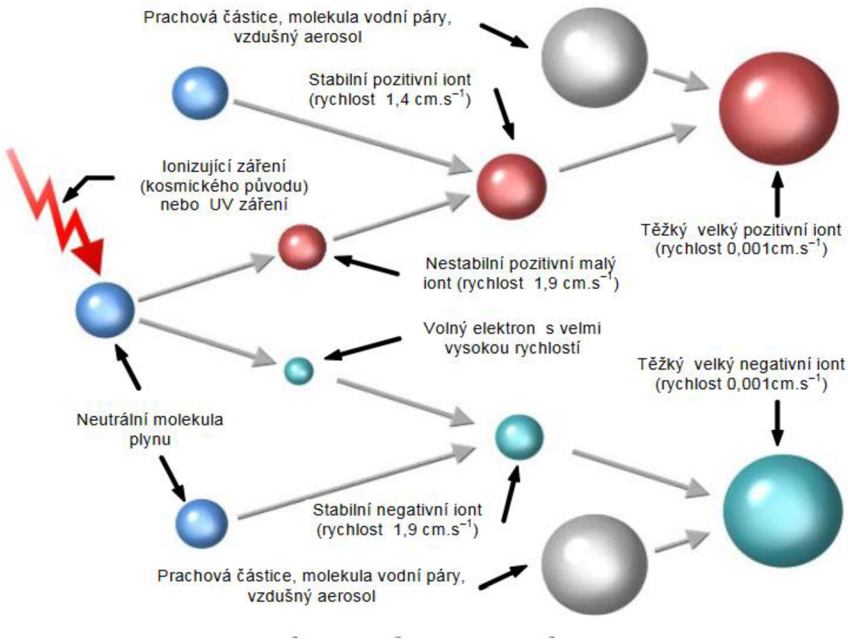
3.2 Proces vzniku iontů

Ionty vznikají přidáním či ubráním elektronů do částice a tím narušení její elektrické neutrality. Tento proces nazýváme ionizací. K uvolnění jednoho elektronu, a tudíž započetí ionizace je potřeba částici dodat určitou minimální energii zvanou ionizační potenciál. Tuto energii lze částici dodat různými způsoby např. dopadáním slunečního záření či radiací. Velikost minimálního ionizačního potenciálu je závislá na typu atomu či molekuly. Udává se v elektronvoltech (eV) [13].

Tabulka 3.2 Velikost ionizační energie pro vybrané atomy plynů, [14]

Značka	Prvek	Ionizační potenciál pro uvolnění prvního elektronu
H	Vodík	13.6 eV
O	Kyslík	13.6 eV
N	Dusík	14.5 eV
He	Helium	24.6 eV
Cl	Chlór	12.9 eV
Ar	Argon	15.7 eV
Pozn.: 1 eV = $1{,}6*10^{-19}$ J		

Po uvolnění jednoho nebo více elektronů započne proces ionizace a zůstane kladně nabitý nestabilní iont ze kterého byly elektrony odejmuty a také ony odejmuté elektrony. V procesu ionizace vzduchu se část molekul ionizuje a část pouze excituje na vyšší energetickou hladinu. Průměrná ionizační energie vzduchu obvyklého složení a za běžných teplotních a tlakových podmínek je 34 eV. Zapříčiněno je to faktem, že pouze část molekul se ionizuje, zbytek se pouze excituje do vyššího energetického pásma. Jak kladný iont, tak záporný elektron se spojí s několika blízkými neutrálními molekulami nejčastěji vody nebo amoniaku a stabilizují se. Také je možné spojení iontu s částicí prachu či kouře a vzniku těžkého iontu.



Obrázek 3.1 Proces ionizace, [15]

3.3 Zánik iontů

Ionty mohou zaniknout několika procesy. Jedním z nich je rekombinace kdy se střetnou dva ionty opačného náboje. Při střetu si náboje předají, ty se pak vyrovnají a částice se stanou elektricky neutrálními. Jedná se o proces opačný k ionizaci [2].

Dále ionty zanikají při spojení vzdušného iontu s aerosolovou částicí, zde se nejčastěji uvádějí kondenzační jádra [2].

Posledním způsobem je depozice, tedy ulpění vzdušného iontu na povrchu například stěny interiéru, jeskyně či povrchu Země. Záleží na elektrickém náboji povrchu [16].

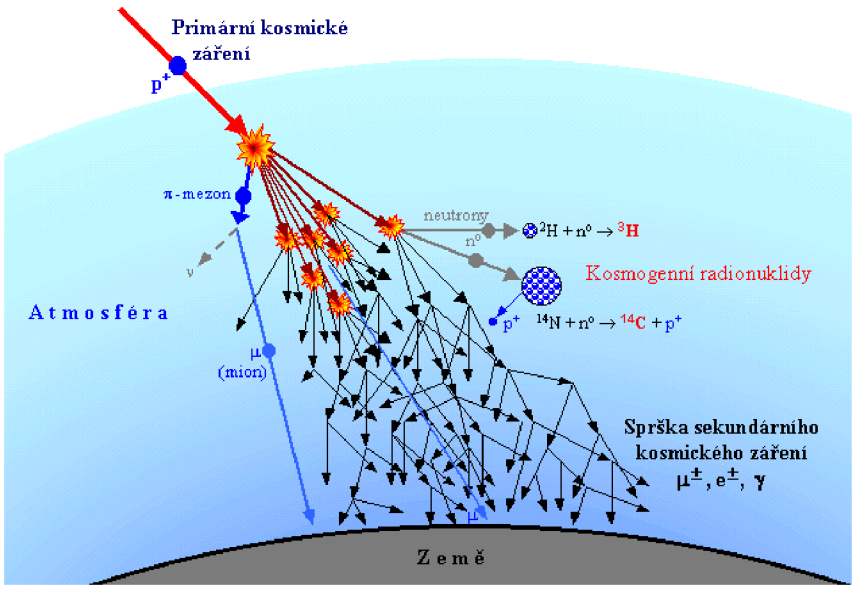
3.4 Příčiny vzniku iontů

Ionizace je způsobena mnoha vlivy, které můžou pocházet z mnoha zdrojů ze Země ale také i mimo ni. Ionizace ovzduší u Zemského povrchu je ovlivňována zejména [15] [17] [5]:

- radioaktivními plyny radonem a thoronem
- radioaktivním zářením z litosféry
- Sekundárním kosmickým zářením

Významným zdrojem ionizace je radioaktivní záření radonu a thoronu, který vzniká z radia a thoria uloženého v zemi. Tyto plyny se také mohou uvolňovat z konstrukcí budov a dle některých teorií ovlivnit místo kam udeří blesk během bouřky. Radioaktivní záření litosféry souvisí s geologickým podložím [16].

Sekundární kosmické záření vzniká, když primární kosmické záření vstupuje do atmosféry. Primární Kosmické záření se sestává zejména z protonů a jader hélia. Při jeho vstupu do Zemské atmosféry dochází k interakci s molekulami vzduchu a vzniká sekundární kosmické záření [2] [18].



Obrázek 3.2 Vznik sekundárního kosmického záření, [18]

Další faktory zvyšující ionizaci ovzduší jsou [12] [17] [16]:

- Lenardův efekt,
- blesky, povětrnostní vlivy,
- UV záření slunce,
- Rudgeův efekt,
- hoření,
- elektrické pole přístrojů.
- koronový výboj

Lenardův efekt se projeví v místech kde se rozstřikuje a naráží voda. Molekuly odtržené od povrchu vody mají záporný náboj a zbylé kapky náboj kladný [19].

Bouřky také výrazně přispívají ke zvýšení koncentrace iontů, a to díky výbojům blesků. Povětrnostní vlivy mohou například přesouvat vyšší koncentrace iontů pomocí větru.

Ve slunečním záření je pro ionizaci důležitá UV složka dopadajícího elektromagnetického záření. Ionizuje UV záření s vlnovou délkou menší jak 350 nm.

Při Rudgerově efektu dochází k ionizaci vzduchu vlivem víření a tření malých částeček (písek, prach, led) ve vzduchu o sebe [17].

Koronového výboje se využívá v domácích ionizátorech ke generování iontů.

3.5 Koncentrace iontů dle prostředí

Jak zmiňuje předešlá kapitola existuje zde celá řada faktorů, které ovlivňují množství iontů v ovzduší, takže jejich koncentrace bude velmi záležet na tom kde se nacházíme.

Tabulka 3.3 Koncentrace iontů ve vzduchu dle prostředí, [17]

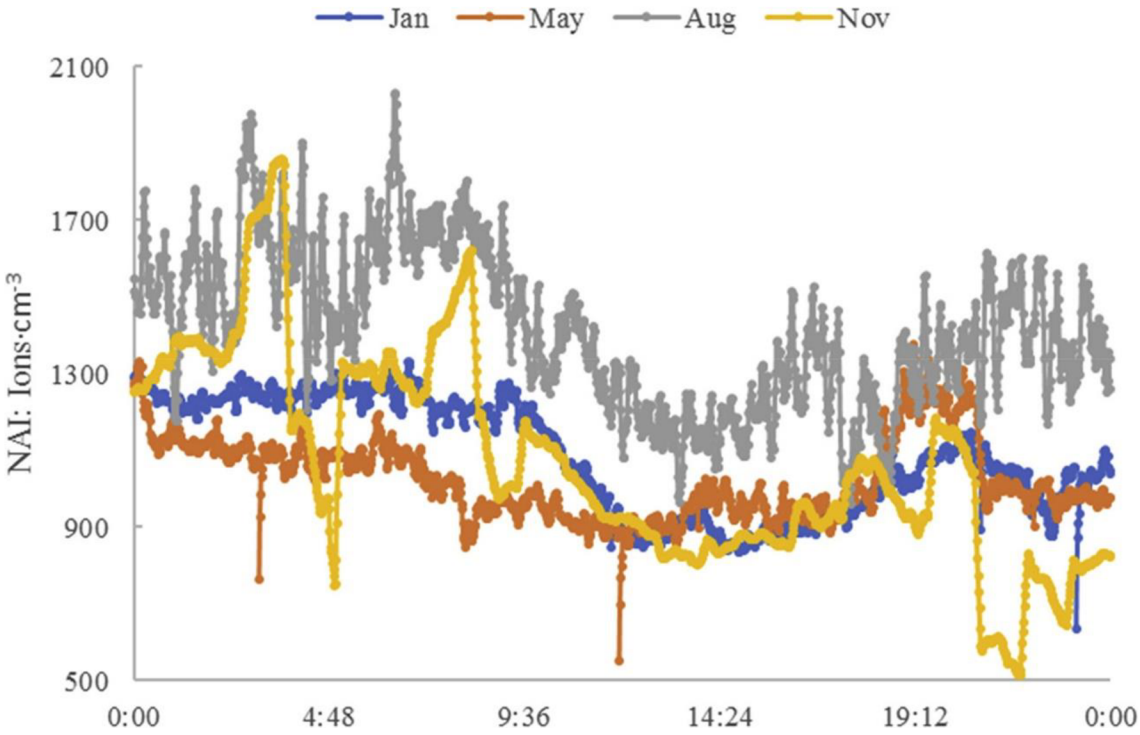
Průměrný počet iontů na 1 cm^3 vzduchu		
Typ prostředí	Negativní ionty	Pozitivní ionty
Čistý horský vzduch	2000	2500
Čistý vzduch v nížině	1500	1800
Před bouřkou	750	2500
Po bouřce	2500	750
Moderní kancelář	150	200
Interiér automobilu za jízdy při zavřených oknech	50	150

Jak je z tabulky č. 3.3 vidět, ve vnitřních prostorách dosahujeme minimálních hodnot koncentrace iontů oproti prostorám venku v přírodě. Můžeme také pozorovat velký vliv bouřky na koncentraci pro člověka prospěšných záporných iontů.

Místa, kde můžeme hledat největší koncentrace iontů jsou však jinde, a to u vodopádů a v jeskyních. U vodopádů je zvýšená koncentrace iontů z důvodu tříštění vody a působení Lenardova efektu popsaného v předešlé kapitole. V jeskyni je důvodem přítomnost radioaktivních materiálů v hornině např. radia. Díky jeho rozpadu vzniká plyn radon, který se usazuje na dně jeskyně. Pomocí ionizujícího záření z radonu probíhá ionizace vzduchu. Kladné ionty, které vzniknou jsou poté přitahovány ke stěnám jeskyně, jelikož má hornina náboj záporný jako zbytek země. Záporné ionty tak zůstanou uprostřed [16].

3.6 Koncentrace iontů dle období

Koncentrace iontů je závislá nejenom na prostředí ale také na denních, měsíčních a ročních cyklech. Denní maximum lze hledat okolo 6 hodiny ranní, minimum naopak po poledni. V rámci měsíce je nevyšší koncentrace během úplňku. Roční maximum pak nalezneme v období léta. Velikost rozdílu maxima a minima je relativní a je nepřímo úměrné znečištění ovzduší. Tedy čím více je ovzduší znečištěno tím je rozdíl maxima a minima menší [12].



Obrázek 3.3 Koncentrace iontů dle měsíce a denní hodiny, [20]

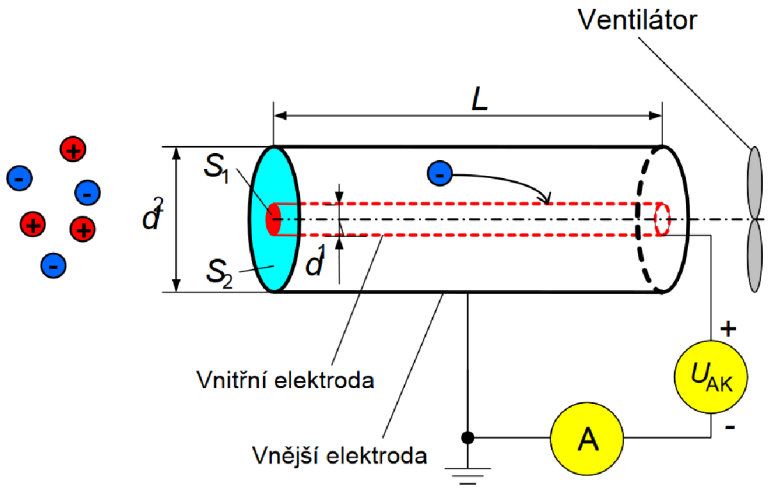
4. MĚŘENÍ VZDUŠNÝCH IONTŮ

Měření vzdušných iontů lze provádět pomocí několika způsobů [15] [21] [22]:

- měření aspiračním kondenzátorem,
- měření deskovým kondenzátorem,
- rozptylová metoda,
- metoda paralelních měření,
- metoda Faradayovy klece.

První dvě zmíněné metody jsou pro měření nejvhodnější, jelikož mohu měřit ionty v širokém rozsahu pohyblivosti [21]. Níže je popsán princip již zmíněného aspiračního kondenzátoru, který bude v práci použit.

Schéma aspiračního kondenzátoru lze vidět na obrázku níže.



Obrázek 4.1 Aspirační kondenzátor, [2]

Aspirační kondenzátor se skládá ze dvou válcových elektrod a ventilátoru pro nasávaní vzduchu. Pro měření je dále připojen zdroj SS napětí a citlivý ampérmetr pro měření proudů v řádech pA. Vzhledem k zvolené polarizaci elektrod měří aspirační kondenzátor pouze ionty jedné polarity [2]. Ionty jsou nasávány do kondenzátoru ventilátorem. Pomocí napětí na SS zdroji vznikne mezi elektrodami elektrické pole. Na jeho intenzitě závisí hodnota mezní pohyblivosti k_m, a tedy i jaké spektrum iontů bude kondenzátorem zchyceno. Ionty s pohyblivostí větší, než k_m dopadnou na elektrodu všechny, kdežto iontů s pohyblivostí menší dopadne jen poměrná část [2] [15]. Pomocí elektrického pole jsou ionty přitahovány k elektrodám. Dopadem iontů v obvodu začne protékat velmi malý proud, který se zachytí ampérmetrem [2] . Pro určení měřeného proudu potřebujeme znát M, tedy množství vzduchu, které kondenzátorem proteče:

$$M = (r_2^2 - r_1^2) \cdot \pi \cdot v_x, \tag{1}$$

kde M je objemový průtok vzduchu kondenzátorem, r_1 je poloměr vnitřní elektrody, r_2 je poloměr vnější elektrody a v_x je průměrná rychlost proudění vzduchu kondenzátorem.

Dále potřebujeme určit kapacitu aspiračního kondenzátoru:

$$C_{AK} = \frac{L}{2 \cdot ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}, \tag{2}$$

kde C_{AK} je kapacita válcového aspiračního kondenzátoru, L je délka aspiračního kondenzátoru, r_1 je poloměr vnitřní elektrody a r_2 je poloměr vnější elektrody.

Nyní lze určit mezní pohyblivost pro zvolené nastavení AK:

$$k_m = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot M}{C_{AK} \cdot U_{AK}}, \tag{3}$$

kde k_m je mezní pohyblivost iontů, ε_0 je permitivita vakua, ε_r je relativní permitivita, C_{AK} je kapacita válcového AK a U_{AK} je polarizační napětí na AK.

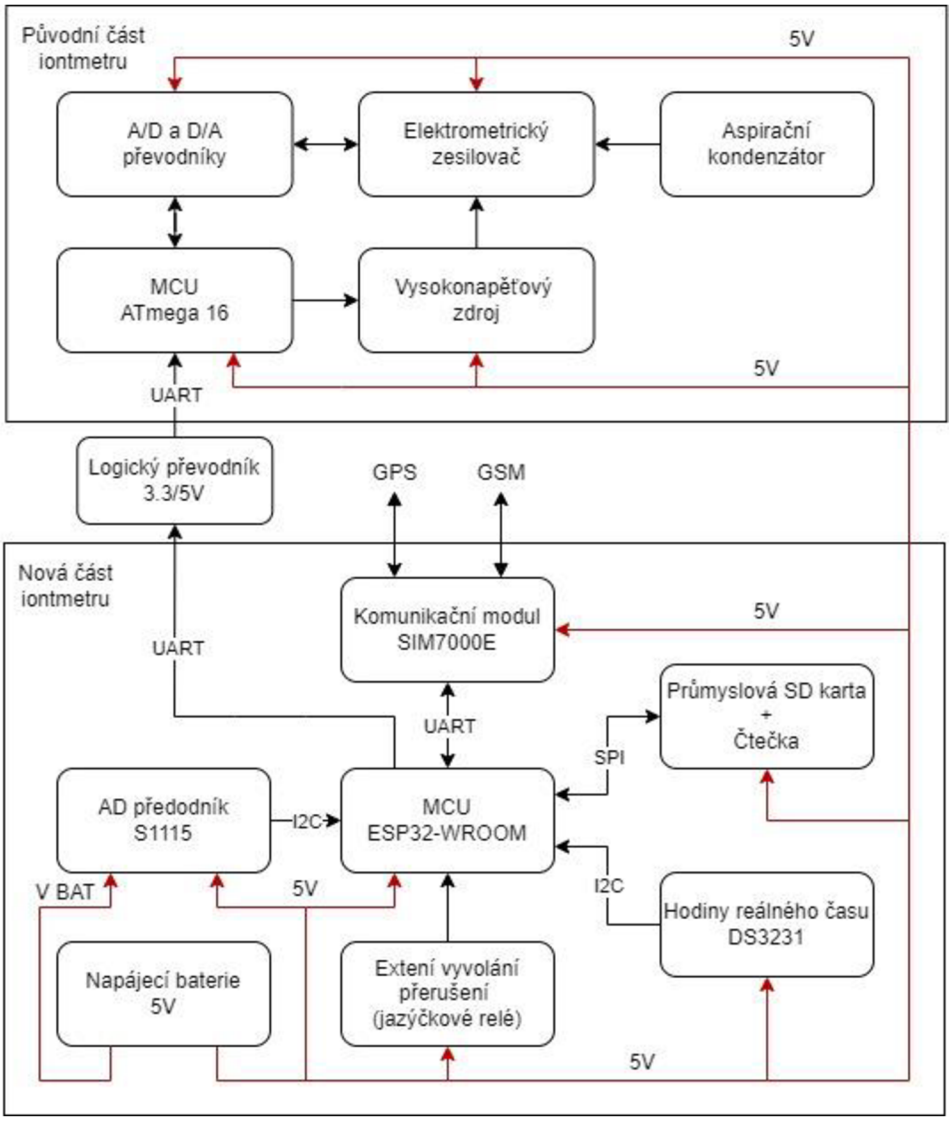
Poté již získáme vztahy pro proud měřený na pikoampérmetru:

$$I_{k<k_m} = \frac{k_m}{k} \cdot n \cdot q \cdot M, \tag{4}$$

$$I_{k \geq k_m} = n \cdot q \cdot M, \tag{5}$$

kde I je naměřený proud pikoampérmetru, k_m je mezní pohyblivost iontů, k je pohyblivost iontů, n je koncentrace lehkých vzdušných iontů, q je elementární náboj a M je objemový průtok vzduchu AK [2].

5. BLOKOVÉ SCHÉMA DIGITÁLNÍ ČÁSTI



Obrázek 5.1 Blokové schéma iontmetru (schéma původní části z [2])

Proud naměřený na aspiračním kondenzátoru UTEE je prvně zesílen na dostatečnou úroveň vhodnou pro převod na digitální hodnotu a pomocí AD převodníků je převeden. Následně je zaznamenáván předřazeným mikrokontrolerem ATmega 16. Poté si tyto data druhý kontrolér ESP32 vyžádá přes sériovou komunikaci UART s logickým převodníkem 3.3V/5V. Následně data zapíše na SD kartu a odešle přes GSM. Pro přesný čas jsou použity hodiny reálného času s teplotní kompenzací EDS3231. Zápis GPS souřadnic a komunikaci přes GSM zajišťuje modul SIM7000E. Pro možnost budoucího rozšíření o další funkce (např. odesílaní dat přímo na mobil) je nachystán vstup pro externí přerušení. Původní elektronika z iontmetru s procesorem ATmega 16 byla použita na doporučení vedoucího bakalářské práce, protože je u ní ověřeno vhodné vedení zemí, nejsou problémy s rušením a celkově jsou s ní dobré zkušenosti.

6. VÝBĚR MIKROPROCESORU

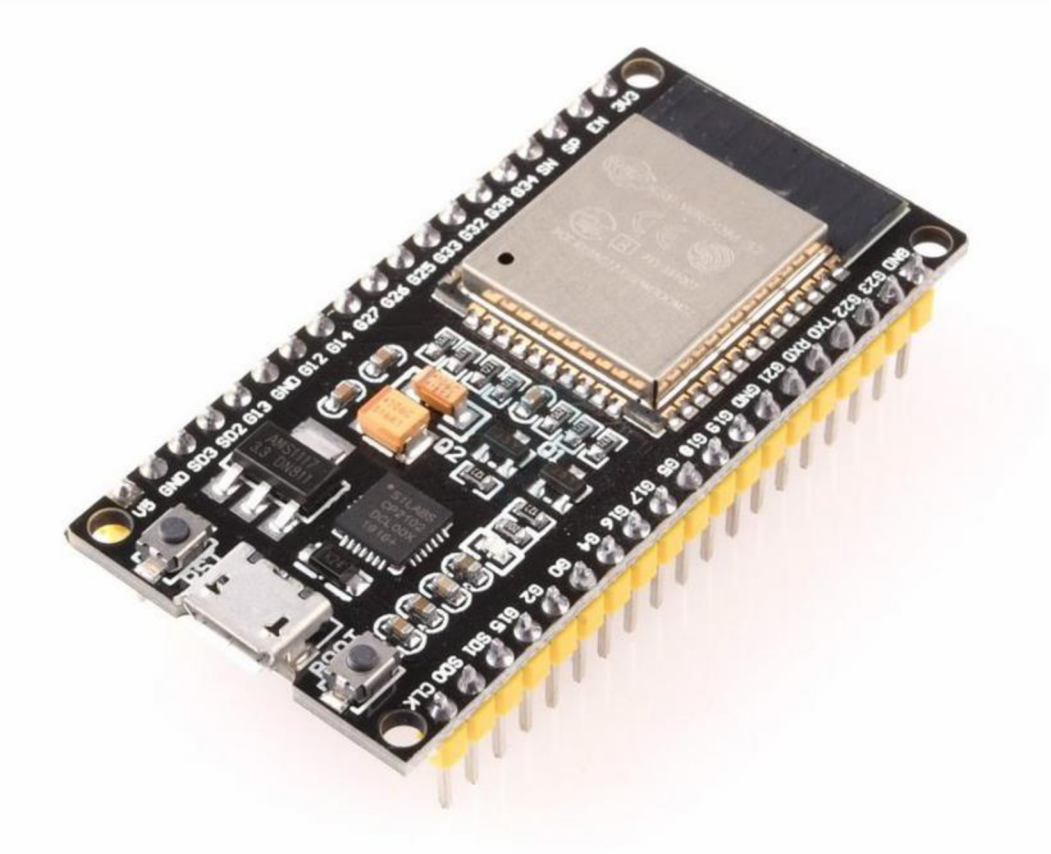
Pro řízení digitální části bylo nejprve potřeba zvolit vhodný mikroprocesor. Nejdůležitějším kritériem pro výběr byla spotřeba, jelikož bude iontmetr provozován na baterii. Další parametry však také hráli roli v rozhodování.

V úvahu padly dva mikrokontrolery, a to Atmega328P na desce Arduino Uno a vývojová desku s procesorem ESP32-WROOM-32.

Při porovnání úsporných módů dosahuje lepších výsledků deska s ESP32, kdy při snížení rychlosti procesoru odebírá proud okolo 3mA, kdežto vývojová deska Arduino Uno odebírá 11mA.Oba procesory pak mají i další úsporné režimy [23] [24].

Další rozdílem je množství FLASH paměti k dispozici, a to 4MB na EPS32 oproti 32kB v procesoru Atmega328P. Podobná situace nastává i u paměti SRAM. Posledním rozdílem je přítomnost Wi-Fi a Bluetooth v procesoru ESP32.

Vzhledem k těmto výhodám procesor EPS32-WROOM-32 bude použit jako řídící jednotka nové desky iontmetru.



Obrázek 6.1 Vývojová deska IoT ESP-WROOM-32, [23]

7. ÚSPORNÉ MÓDY ESP32

Procesory ESP32 nabízí hned několik režimů spotřeby. Spotřeba ESP32 může být v řádu jednotek µA, ale také stovek mA. Při provozu na baterii je tedy důležité jednotlivé režimy spotřeby přepínat. Následující tabulka popisuje jednotlivé módy spotřeby.

Tabulka 7.1 Úsporné módy ESP32, [25] [26]

Mód spotřeby	Aktivní	Modem Sleep	Light Sleep	Deep Sleep	Hibernace
Procesor	Zapnuto	Zapnuto	Pauza	Vypnuto	Vypnuto
Bluetooth/Wi-Fi	Zapnuto	Vypnuto	Vypnuto	Vypnuto	Vypnuto
RTC + RTC paměť	Zapnuto	Zapnuto	Zapnuto	Zapnuto	Pouze RTC
Periferie	Zapnuto	Zapnuto	Zapnuto	Vypnuto	Vypnuto
ULP koprocesor	Zapnuto	Zapnuto	Zapnuto	Zapnuto	Vypnuto
Spotřeba	95-240mA	2-50mA	0,8mA	10-150µA	5µA

V aktivním režimu jsou zapnuty úplně všechny funkce ESP32. Spotřeba se v tomto módu pohybuje od 95 do 240mA a je závislá na zvoleném typu komunikace. Takt procesoru je maximální.

Režim Modem Sleep vypne komunikační modul a tím uspoří značnou část energie. Spotřebu pak lze dále snížit zmenšením taktu procesoru až na 2mA. Pokud je potřeba udržovat procesor připojen k síti je provozován takzvaný Association sleep patern, který v určitém intervalu komunikační modul zapne a do sítě se přihlásí, aby spojení přetrvalo [26].

V režimu Light Sleep dojde k pozastavení činnosti procesoru, digitálních periferií a většiny RAM. Jsou v režimu clock-gate, kdy jsou od nich odpojeny hodinové pulsy [26]. Jakékoliv události procesor vzbudí (externí i interní). Spotřeba je okolo 0,8mA [25].

Mód Deep Sleep nechá aktivní pouze RTC hodiny a jejich paměť a ULP koprocesor.

Spotřebuje mezi 10 a 150µA. Záleží na provozu koprocesoru. Data o Wi-Fi a Bluetooth připojení se uloží do RTC paměti [25]. Přes ULP koprocesor lze přistupovat nadále k periferiím a využít je k probuzení čipu [26].

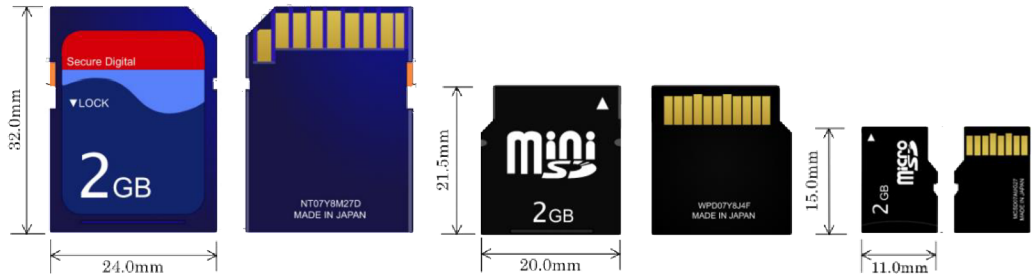
Posledním módem je hibernace, kde je vypnuto vše kromě RTC hodin a určitých GPIO pinů pro probuzení. V tomto režimu nelze ukládat data, jelikož je vypnuta i paměť RTC. Tento režim dosahuje nejnižší spotřeby a to 5µA [25].

8. SD KARTY

SD karty, plným názvem Secure Digital karty, jsou paměťové úložiště v kompaktním přenosném formátu, kdy je jako úložné médium použita flash paměť. Standart SD byl vyvinut společnostmi Toshiba, Panasonic a San Disk a zaveden v roce 1999 jako nástupce předchozího standartu Multi Media Cards [27]. V dnešní době je lze pořídit v několika velikostních provedeních a celé škále paměťových kapacit od pár stovek MB až po momentálně největší komerčně dostupné karty o velikosti 1TB (k roku 2021) [28]. Dále můžeme karty rozlišovat také pro běžné použití například do domácího digitálního fotoaparátu či mobilu, anebo karty průmyslové vyznačující se mnohem delší životností a množstvím pokročilejších funkcí [29].

8.1 Fyzická charakteristika SD karty

Karty existují ve třech velikostech, a to SD, mini SD a micro SD. S tím, že formát mini SD je dnes již defacto nepoužíván. Velký formát SD nalezneme například v zrcadlových fotoaparátech. Tato velikost má na rozdíl od obou menších variant fyzický zámek zápisu. Formát micro najde uplatnění kupříkladu jako rozšiřující úložiště v mobilních telefonech. Menší verzi karty lze pomocí adaptérů použít v zařízeních kde je potřeba větší varianta.

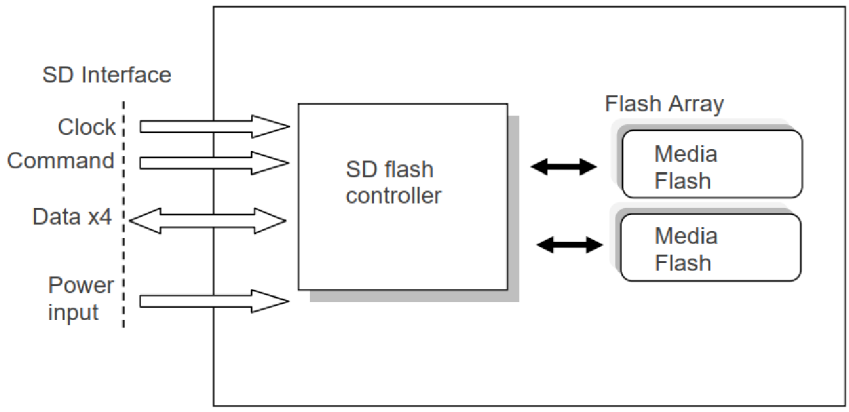


Obrázek 8.1 Velikosti SD karet, [30]

8.2 Vnitřní struktura SD karty

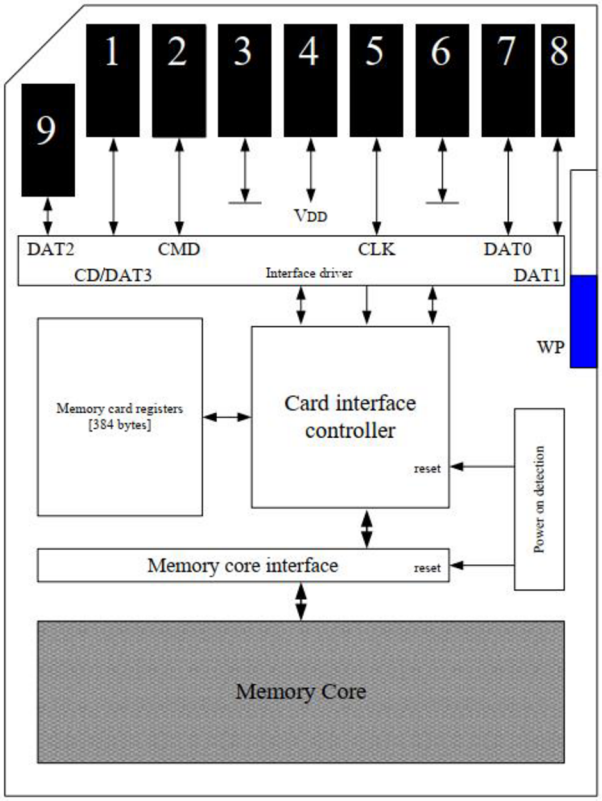
Uvnitř SD karty lze nalézt tři hlavní části:

- vstupně výstupní rozhraní pro komunikaci v SD nebo SPI módu,
- řídící modul paměti,
- jedna či více pamětí typu flash.



Obrázek 8.2 Blokové schéma SD karty, [31]

Na obrázku 8.3 lze vidět dopodrobna rozkreslenou vnitřní strukturu. Na vrchu karty se nachází samotné piny rozhraní a pod nimi jejich řídící ovladač. Uprostřed lze nalézt hlavní řídící jednotku karty a vedle ní registry o velikosti 384 bytů obsahující specifické informace o kartě a konfigurační data. Na spodku karty se nachází samotné paměťové jádro typu NAND flash a jeho čtecí a zápisová jednotka.



Obrázek 8.3 Vnitřní struktura SD karty, [31]

V následující tabulce 8.1 jsou vypsány hlavní registry nacházející se na SD kartě a jejich šířka a popis.

Tabulka 8.1 Hlavní registry SD karty, [32] [33]

Zkratka	Šířka	Název	Popis
OCR	32	Operation Condition Register	Obsahuje napěťový profil karty a stavový bit power-up procesu
CID	128	Card Identification Number	Obsahuje údaje o výrobku jako sériové číslo, výrobce, datum výroby atd.
CSD	128	Card Specific Data	Poskytuje informace o přístupu k datům, souborový formát, typ opravy chyb atd.
RCA	16	Relative Card Address	Pouze pro SD mód, zapisovatelný, nese adresu karty
DSR	16	Drive Stafe Register (Optional)	Volitelný, lze využít ke zlepšení výkonu na sběrnici pro dlouhé operace
SCR	64	SD Configuration Register	Poskytuje informace o speciálních funkcích karty

8.3 Velikostní standarty SD karet

V současné době existují čtyři velikostní standarty, z nichž jsou aktuálně používány jenom tři, přičemž poslední nejnovější standart SDUC je připraven pro budoucí použití s podporou karet až do velikosti 128TB. V následující tabulce číslo 8.2 lze vidět porovnání jednotlivých standardů.

Tabulka 8.2 Velikostní třídy SD karet, [34]

Standart		SD	SDHC	SDXC	SDUC
Kapacita	Min		>2 GB	>32 GB	>2 TB
	Max	2 GB	32 GB	2TB	128 TB
Souborový systém		FAT12/FAT16	FAT32	exFAT	exFAT

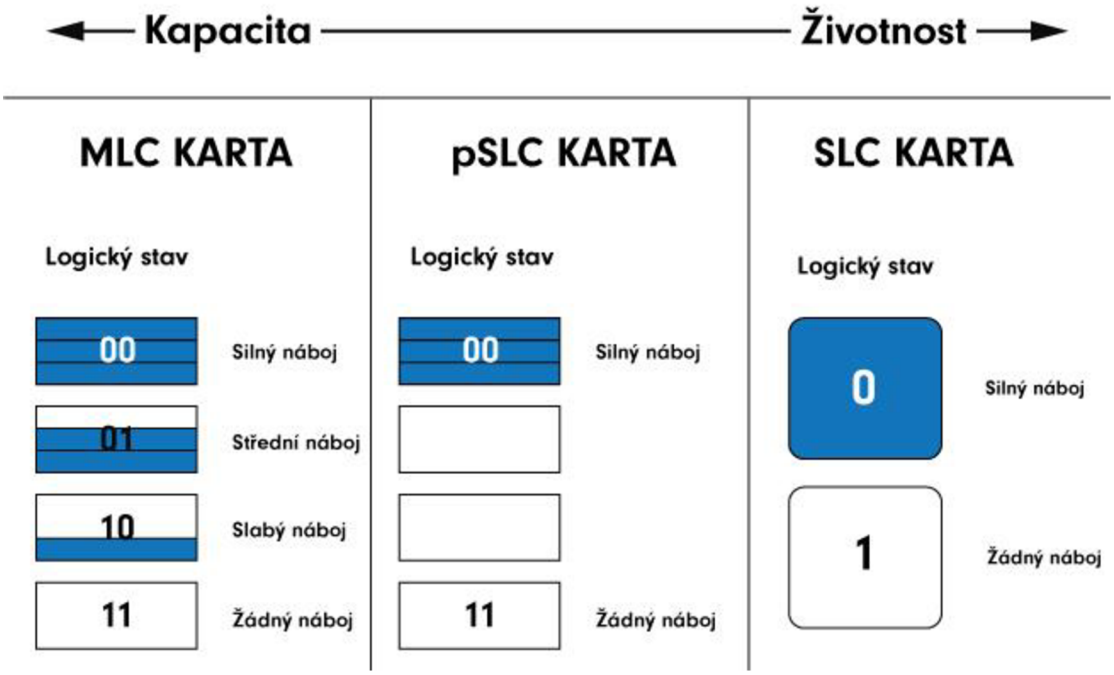
8.4 Sběrnice SD karet

Dnes existují dvě rozhraní, na kterých standardizované SD karty pracují, a to původní rozhraní SD na kterém pracují Default Speed, High Speed a UHS sběrnice a nové rozhraní PCIe třetí a čtvrté generace pro SD Express. Pro dosažení vyšších rychlostí bylo potřeba další kontakty pro rozšíření šířky komunikace. Díky tomu se setkáme u sběrnic UHS-II a vyšší s druhou řadou kontaktů a u nejnovější generace SD Express i se třetí řadou kontaktů. Pomocí takovéhoto rozšíření sběrnice je možno dosáhnout u budoucí generace SD Express 8.0 rychlosti blížící se ke 4 GB/sec [35]. Všechny zařízení jsou zpětně kompatibilní se staršími typy sběrnic, avšak nelze pak dosáhnout vyšší rychlosti.

Obrázek 8.4 Příklad karty se sběrnicí SD Express (vpravo), [36]

8.5 Architektury pamětí SD karet

Architektury NAND flash pamětí používané SSD úložištích dělíme podle počtu bitů zapisovaných do jedné buňky. V současnosti se vyrábí paměti, ve kterých se zapisuje od jednoho do čtyři bitů do jedné buňky [37] [38]. Čím méně bitů je zapisovaných do jedné buňky paměti, tím větší je její životnost a rychlost, avšak tímto rostou náklady na výrobu a strmě stoupá poměr ceny a velikosti [38]. Díky této cenové náročnosti jsou vyráběny pseudo jedno úrovňové buňky, které vyjadřují jakýsi kompromis mezi cenou karty a její spolehlivostí.

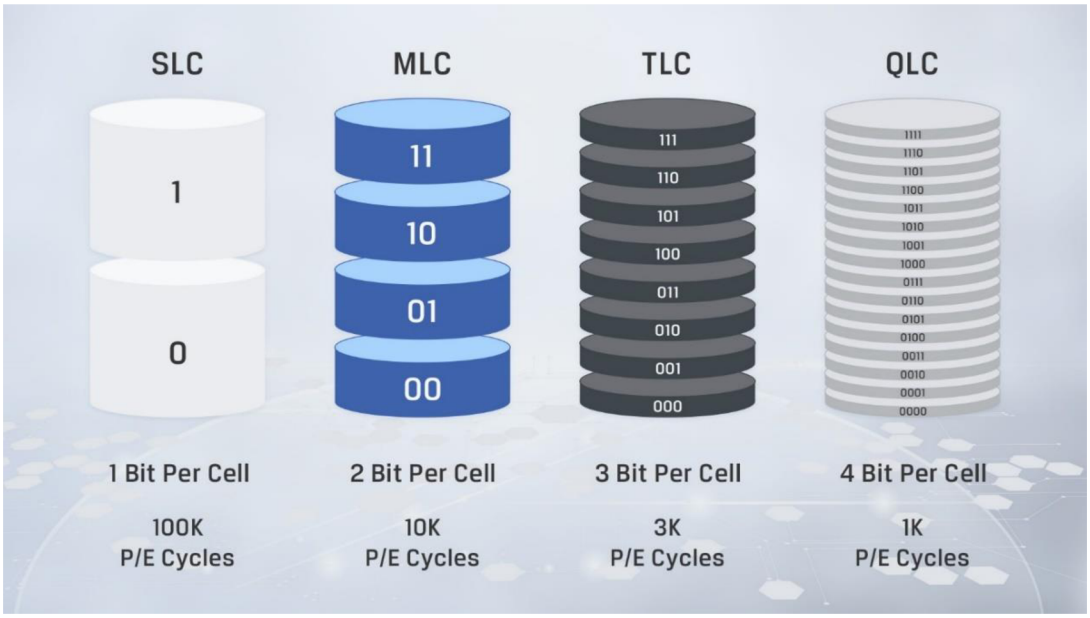


Obrázek 8.5 Architektury NAND flash pamětí v SD kartách, [39]

Na obrázku 8.5 můžeme jasně vidět rozdíly v zápisu v jednotlivých architekturách. SLC zapisují pouze jeden bit, kdežto MLC karty zapisují bity dva. Dále také existují trojbitové buňky TCL a čtyřbitové QCL. Uprostřed můžeme vidět pSCL kartu, která emuluje standartní SCL buňku na MCL technologii využitím pouze krajních stavů. Co se týče počtu možných přepisů s přehledem vyhrávají SCL karty s životností až 60 tisíc přepisů, dále pak sPLC karty, které jich zvládnou okolo 20 tisíc. MLC karty jsou na tom s životností již o něco hůře a to s 3000 možnými přepisy. TLC a QLC mají životnost okolo 1000 přepisů [39] [40]. Záleží také na použité technologii NAND pamětí. Při použití 3D NAND oproti 2D NAND lze ještě zvýšit možný počet zápisů u pamětí s víceúrovňovými buňkami, a to i několikanásobně [40]. Přehledněji rozepsané architektury obsahuje následující tabulka č. 8.3.

Tabulka 8.3 Typy architektur NAND flash pamětí, [38] [39] [41]

Zkratka	Název	Počet bitů v buňce	Počet buněk	Popis
SLC	Single Level Cell	1	2	Zapisuje pouze jeden bit do buňky. Jedná se o nejspolehlivější a nejrychlejší typ zápisu vyniká také nízkou spotřebou, nevýhodou je vysoká náročnost na výrobu, a tudíž i cena.
MLC	Multi Level Cell	2	4	Do buňky zapisuje bity dva. Nejpoužívanější architektura v komerčních zařízeních. Má menší životnost a vyšší spotřebu energie, avšak dosahuje vyšší kapacity při nižší ceně.
TLC	Triple Level Cell	3	8	Zapisuje tři bity do buňky. Má nižší trvanlivost a přenosovou rychlost, avšak ne tak vysokou spotřebu energie. Vyskytuje se ve většině spotřebitelských zařízení.
QLC	Quad Level Cell	4	16	Nejnovější technologie, kdy jsou do buňky bity zapisovány čtyři. Zatím se vyskytuje pouze na SSD nikoli SD. Nejnižší poměr ceny a kapacity. Nejnižší výdrž a velká chybovost.
pSLC	pseudo Single Level Cell	2 nebo 3	4 nebo 8	Zapisuje se pouze na krajní stavy MLC nebo TLC pamětí, čímž se simuluje klasické SLC. Mnohem vyšší výdrž než MLC/TLC, poloviční cena oproti SLC.



Obrázek 8.6 SLC, MLC, TLC a QLC architektury, [42]

8.6 Průmyslové SD karty

Pro aplikace, kde je potřeba vysoká spolehlivost a odolnost, poskytují výrobci takzvané Industrial Grade neboli průmyslové karty. Tyto karty jsou navrženy tak aby mohli pracovat nepřetržitě 24 hodin denně. Mezi zásadní nadstandartní vlastnosti takovýchto SD karet patří [43] [44] [45]:

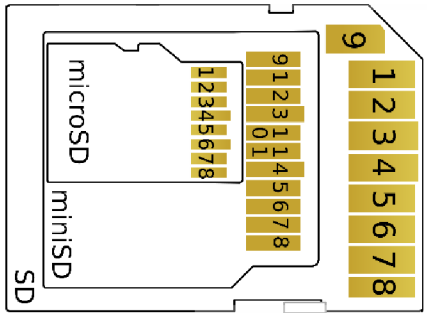
- použití SLC, pSLC, případně MLC architektury pro větší počet možných zápisů a vysokou rychlost,
- vysoká odolnost proti okolním vlivům (teplotní odolnost od -40 °C až +85 °C, IP 57/67, odolnost proti statické elektřině, elektromagnetickému rušení, nárazu a vibracím),
- monitoring životnosti karty (S.M.A.R.T.),
- korekční algoritmy pro ochranu dat,
- nástroje správy bloků (automatické přesuny dat z bloků s více chybami do bloků zdravých),
- ochrany proti ztrátě dat při výpadku napájení,
- nástroje bezpečného mazání dat či úplného zničení karty.

Karty mohou mít více ochran či korekčních algoritmů, to vše záleží na nabídce výrobce či požadavcích zákazníka. Názvy jednotlivých technologií zde nejsou uvedeny, jelikož každý výrobce si je označuje jiným názvem.

Vzhledem k výborným vlastnostem průmyslových SD karet s SLC architekturou pamětí hlavně co se týče jejich spolehlivosti ochrany a setrvání dat, bude právě tento typ karty použit ve finální konstrukci iontmetru.

8.7 Zapojení SD karet

Každá z typů karet má jiný počet pinů, a to 8, 9 nebo 11, které jsou různě rozmístěné v závislosti na typu karty. Zapojení jednotlivých kontaktů na sběrnici SD nebo sběrnici SPI pro mikropočítače a jejich rozložení na kartě je uvedeno v následujícím obrázku 8.7 a tabulce 8.4.



Obrázek 8.7 Rozmístění jednotlivých kontaktů na SD kartách, [46]

Tabulka 8.4 Rozložení jednotlivých kontaktů a jejich příslušné připojení na sběrnici SPI, [47] [48]

Pin	SD		mini SD		micro SD	
	SD	SPI	SD	SPI	SD	SPI
1	CD/DAT3	CS	CD/DAT3	CS	DAT2	
2	CMD	DI	CMD	DI	CD/DAT3	CS
3	Vss1	Vss1	Vss1	Vss1	CMD	DI
4	Vdd	Vdd	Vdd	Vdd	Vdd	Vdd
5	CLK	SCLK	CLK	SCLK	CLK	SCLK
6	Vss2	Vss2	Vss2	Vss2	Vss	Vss
7	DAT0	DO	DAT0	DO	DAT0	DO
8	DAT1		DAT1		DAT1	
9	DAT2		DAT2			
10			NC			
11			NC			

Jak je vidět v tabulce 8.6, piny mají různé funkce podle toho, jestli pracují v módu SD anebo v módu pro sběrnici SPI. V následující tabulce 8.7 jsou popsány funkce jednotlivých pinů na klasické velikosti SD karty.

Tabulka 8.5 Popis funkcí jednotlivých pinů na standartní velikosti SD karty, [31]

SD mód		SPI mód	
Jméno	Funkce	Jméno	Funkce
CD/DAT3	Card detect/Data line [Bit 3]	CS	Chip select
CMD	Command/Response	DI	Data in
Vss	Supply voltage ground	Vss	Supply voltage ground
Vdd	Supply voltage	Vdd	Supply voltage
CLK	Clock	SCLK	Clock
DAT0	Data line [Bit 0]	DO	Data out
DAT1	Data line [Bit 1]		
DAT2	Data line [Bit 2]		
NC	Not connected		

Při funkci karty v módu SD slouží piny DAT0 až DAT3 k přenosu dat čtyřbitově nebo jednobitově. Pin CMD slouží k odesílání příkazů pro přenos a příjmu odezvy na ony příkazy [49]. Na pinech Vss se nachází zem. Na pinu Vdd je napájení 3.3V s běžným tolerančním rozsahem 2.7V–3.6V [31]. Clock pin obsahuje hodinový signál pro určení rychlosti komunikace na lince. Piny NC vyskytující se pouze u mini SD karty jsou nepřipojeny.

Režim na lince SPI využívá menší množství pinů. Stejným způsobem jsou zde přítomny piny SCLK, Vdd a Vss. Data proudí skrz pin DI směrem na kartu a DO směrem z karty. CS pin slouží k identifikaci zařízení do SPI sítě.

9. POUŽITÝ HARDWARE

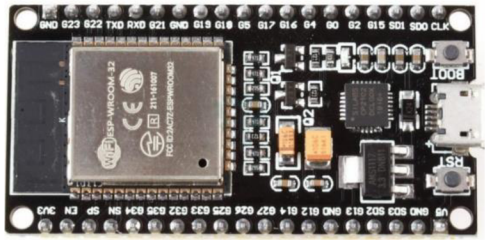
9.1 MCU ESP32

Mikroprocesor ESP32 je dvoujádrový procesor vyvíjený firmou Espessif. Jedná se o nástupce čipu ESP8266 [50]. V práci bude použita vývojová deska s procesorem ze série EPS32-WROOM-32. Její specifikace jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 9.1 Parametry vývojové desky IoT ESP-WROOM-32, [23]

Frekvence CPU	80–240 MHz
Programová flash	4 MB
SRAM	520 kB
Wi-Fi	2,4 - 2,5 GHz, až 150 Mbps
Bluetooth	v 4.2
Hardwarově akcelerované kryptování	AES, SHA2, Elliptical Curve Cryptography, RSA-4096
Rozhraní paměťových modulů	SD, SDIO, CE-ATA, MMC, eMMC
Komunikační rozhraní	3xUART, 3xSPI, SDIO, 2xI2C, 2xI2S, IR
Rozhraní vstupně-výstupní	34xGPIO, 18xADC, 2xDAC, 16xLED PWM, LNA, kapacitní dotykové senzory, hallovy senzory
RTC	Ano, s odděleným oscilátorem 32 kHz
Interní oscilátor pro CPU	26 MHz
Režimy nízké spotřeby	do 3mA při aktivním režimu, 2.5 uA při hibernaci
Napěťové úrovně	3.3V nebo 5V logická, 5 V napájení

Jak je vidět v tabulce mikroprocesor ESP32-WROOM-32 umístěný na vývojové desce poskytuje dvoujádrový procesor se frekvencí až 240MHz, 4MB flash paměti pro program a 512kB SRAM. Dále nabízí Wi-Fi a Bluetooth s integrovanou anténou na PCB, dostatek GPIO pinů pro propojení s dalšími periferiemi, hodiny reálného času a řadu dalších funkcí.



Obrázek 9.1 Vývojová deska IoT ESP-WROOM-32, [23]

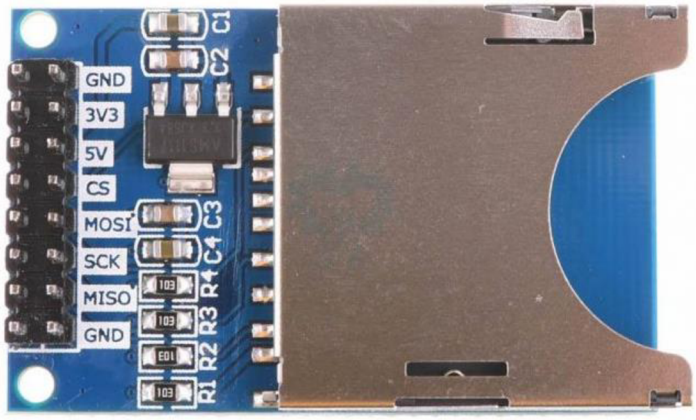
9.2 Průmyslová SD karta Apacer

Na zápis dat bude využita 256MB SD karta Apacer Industrial. Byla zvolena díky technologii SLC, která zajišťuje dlouhou životnost karty a velmi malou chybovost. Její malá kapacita není v tomto případě podstatná, jelikož objem zapisovaných dat nebude nijak obrovský.

Obrázek 9.2 Průmyslová SD SLC karta Apacer Industrial 256MB, [51]

9.3 Čtečka SD karet

Pro čtení SD karty bude použita čtečka připravena na komunikaci na sériové lince SPI. Čtečka je napájena pomocí 3,3 nebo 5V.



Obrázek 9.3 Čtečka SD, [52]

9.4 Komunikační modul SIM7000E

Pro odeslání naměřených dat bude použit modul WaveShare SIM700E určený původně pro Raspberry Pi. Modul obsahuje slot pro SIM kartu, díky které je možno využít připojení k některé z podporovaných IoT sítí. Modul podporuje IoT standarty NB-IoT, eMTC, EDGE, GPRS a GNSS. Dále je také vybaven GPS přijímačem pro přesné určení polohy, na které by GSM sítě nestačily. Pro komunikaci s deskami typu ESP32 nebo Arduino je schopen komunikovat přes rozhraní UART [53].

Obrázek 9.4 Komunikační modul SIM7000E, [53]

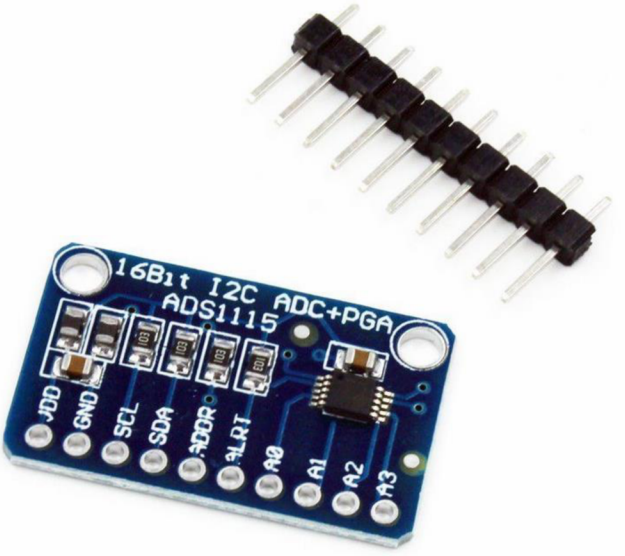
9.5 Hodiny reálného času DS3231

Jedná se o velmi přesné hodiny reálného času, a to díky teplotně kompenzovanému krystalovému oscilátoru. Komunikuje přes sběrnici I2C. Modul je vybaven záložní 3.6V baterií a EEPROM pamětí 32kB pro případ výpadku napájení. Napájení 3.3 až 5.5V [54].

Obrázek 9.5 Hodiny reálného času DS3231, [54]

9.6 AD převodník ADS1115

AD převodník bude v iontmetru sloužit ke sledování napětí na napájecí baterii. Zvolený převodník obsahuje až 4 kanály pro převod, nebo 2 diferenční. Nabízí 16-ti bitovou přesnost a komunikuje po sběrnici I2C. Lze také zvolit rychlost vzorkování od 8 až po 860 vzorků za sekundu [55].

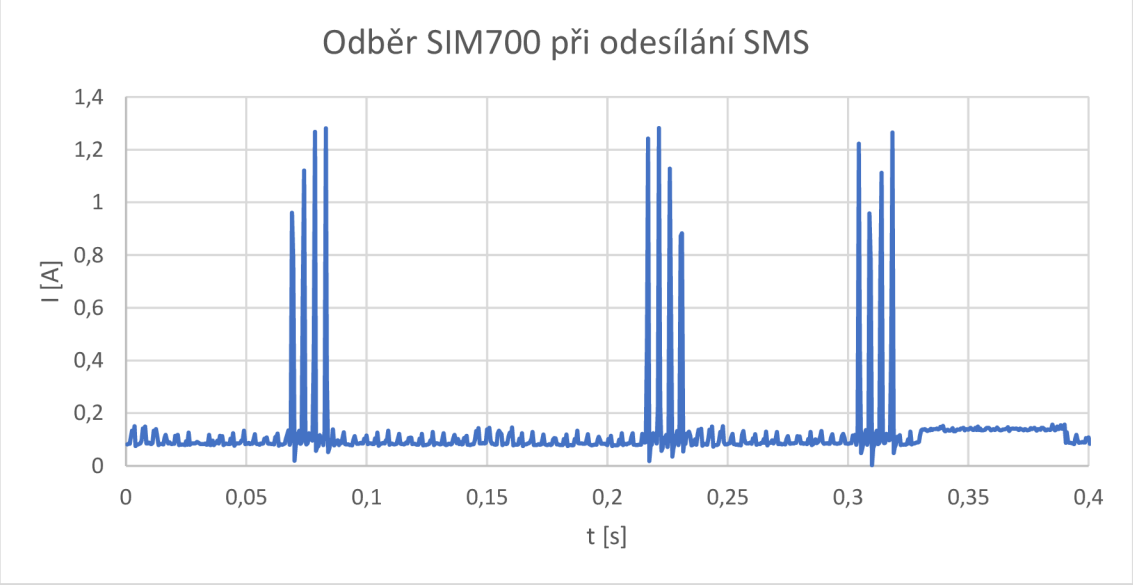


Obrázek 9.6 AD převodník ADS1115, [55]

10. MĚŘENÍ PROUDOVÝCH NÁROKŮ SIM7000

Jelikož má komunikační modul SIM7000 v čase vysílání do sítě GSM dosti vysoké odběry proudů, dle datasheetu až 2A [56], bylo tedy třeba odběr proměřit a určit reálný odběr proudu. Měření probíhalo v laboratoři UTEE za pomocí proudové sondy připojené k osciloskopu.

Obrázek 10.1 Proudový odběr modulu SIM7000 při přihlašování do GMS sítě



Obrázek 10.2 Proudový odběr modulu SIM7000 při odesílání SMS do sítě GSM

Jak lze z grafů vidět, odběr ve špičkách dosahuje až 1,3A. Aby nedošlo při takto vysokých skocích k poklesu napětí na zdroji, a tedy i k možnému nežádanému resetu MCU je potřeba jak dobrého zdroje, tak kvalitního kondenzátoru.

Velikost potřebného kondenzátoru zjistíme následovně:

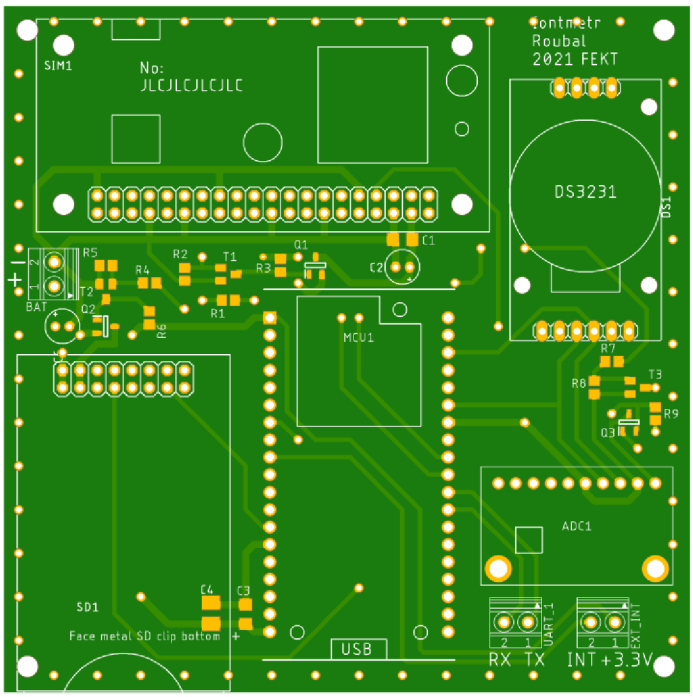
$$C_k = \frac{i \cdot t}{U_N - U_Z} = \frac{1{,}3A \cdot 1ms}{5-4{,}2} = 162\ uF\ , \tag{6}$$

kde C_k je kapacita kompenzačního kondenzátoru, i je maximální hodnota měřeného proudu, t je doba zvýšené proudové zátěže, U_N je napájecí napětí a U_Z napětí při plné zátěži. V rámci rezervy byl z řady zvolen kondenzátor 220uF. Je nutné volit typ s nízkým ESR (ekvivalentním sériovým odporem).

Na IoT GSM sítě v ČR je nejvýhodnější využít předplacenou SIM kartu od Kaktusu. Její výhodou je účtování dat po 100 kB, kde jeden přenos dat v přepočtu vychází na 0,1 Kč. Výhodou sítě GSM je vysoké pokrytí po celé ČR.

11. NÁVRH DPS

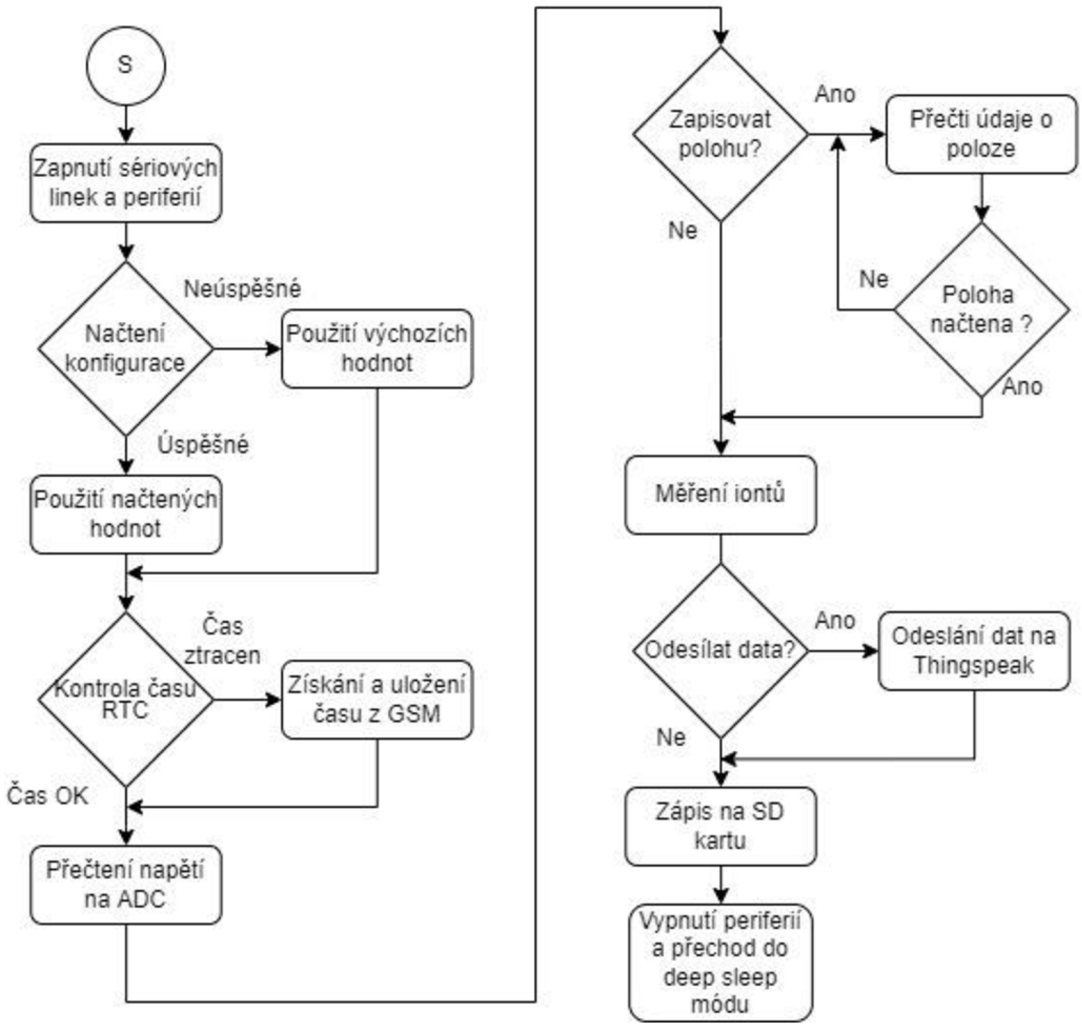
Návrh desky pro propojení komponentů byl realizován v programu Autodesk Eagle. Deska je oboustranná a byla na zakázku vyrobena firmou JLC PCB. Na desce se kromě pozic pro zvolené moduly také nachází kondenzátory pro kompenzaci proudových špiček a tři tranzistorové obvody pro spínání příslušných modulů. Níže je náhledový obrázek desky. Celé schéma, podklady pro výrobu a soupiska součástek jsou uvedeny na konci v přílohách.



Obrázek 11.1 Pohled na DPS z horní strany

12. NÁVRH OBSLUŽNÉHO SOFTWARU

Řídící software pro procesor ESP32 byl vyvíjen v jazyce C++ na open source frameworku Arduino. Celý program je koncipován do inicializační funkce `setup()`. Po skončení této funkce přejde procesor do módu deep sleep a po probuzení se sekvence opakuje. Vše popisuje následující vývojový diagram.



Obrázek 12.1 Hlavní vývojový diagram

Prvně dojde k zapnutí zbylých modulů na desce a inicializaci sériových linek. Následně je načtena konfigurace měření z konfiguračního souboru na SD kartě. Dále probíhá kontrola času na RTC a v případě že by došlo k jeho výpadku byl by načten nový čas ze sítě GSM. Pak dojde k zjištění napětí na ADC. Pokud chceme dle konfigurace získávat i polohu, dojde k jejímu načtení. Nyní přichází na řadu komunikace s druhou deskou iontmetru UTEE a samotné měření iontů. Komunikace probíhá po sériové lince za pomocí speciálních příkazů popsaných dále. Pak opět dle konfigurace může dojít k odeslání dat na Thingspeak přes GSM. Na závěr dojde k zápisu dat na SD kartu a následnému vypnutí periferií a přechodu do deep sleep módu na nastavenou dobu.

12.1 Navržené funkce

Následující tabulka obsahuje seznam vytvořených funkcí, jejich parametry a popis.

Tabulka 12.1 Vytvořené funkce

Funkce	Parametr	Popis
ATcomm	String command	Odeslání a výpis odezvy na příkazy po sériové lince
GetGsmTime		Získá čas ze sítě GSM pomocí modulu SIM7000
getTime		Zapíše získaný čas a datum do příslušných stringů
getPos		Získá údaj o poloze
getCoords		Zapsaní polohy do příslušných proměnných ze získaného stringu
grabByEndMarker		Načtení odezvy sériového příkazu do proměnné
getVoltage		Získá data o napětí z ADC převodníku
rtcCheckTime		Kontrola času RTC
measureIons		Provede měření vzdušných iontů
sendData		Odešle změřená data na Thingspeak
saveToSD		Uloží změřená data na SD kartu
readSerial		Přečte odezvu na sériové lince
getConfig		Načte konfiguraci měření z SD karty

```
doba_cekani[min]:2
pocet_mereni[-]:2
interval_mereni[ms]:2000
interval_kalibrace[pocet_cyklu]:2
interval_urceni_polohy[pocet_cyklu]:2
interval_posilani_dat[pocet_cyklu]:1
polarizacni_napeti[V]:25.0
polarita_iontu[k/z]:k
vysilani_dat[a/n]:a
zjistovani_polohy[a/n]:a
---------------------------------------
```

Obrázek 12.2 Nastavované parametry v konfiguračním souboru na SD kartě

12.2 Komunikace s iontmetrem

Řídící deska iontmertu komunikuje pomocí speciálních C příkazů po sériové lince. Původní komunikační protokol se sestával z 18 příkazů a tyto příkazy byly posílány z PC s příslušným softwarem. Někdejší student Václav Kadlček v rámci své diplomové práce rozšířil protokol o další dva příkazy pro požadavek na aktuální měřenou hodnotu a pro provádění kalibrace s odezvou. Následující tabulka popisuje jednotlivé příkazy.

Tabulka 12.2 Komunikační protokol iontmetru, [3]

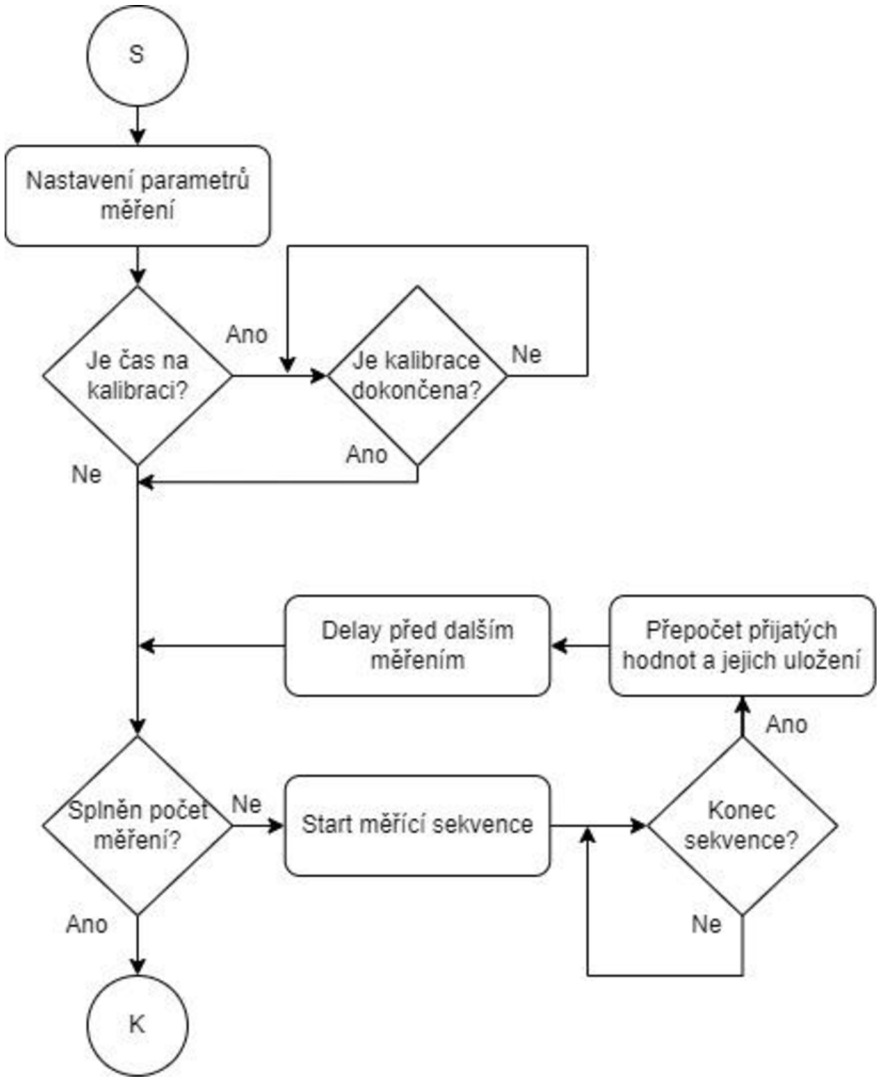
Příkaz	Parametr	Zakončení	Popis
C01	kladný int	#	Délka měření [min]
C02	kladný int	#	Interval měření [ms]
C03	kladný int	#	Zpoždění před měřením [min]
C04	char 'k'/'z'		Polarita měřených iontů kladná/záporná
C05	int 0/1/2/3		Rozsah měření
C06	char 'a'/'m'		Automatické/manuální ovládání
C07			Spuštění kalibrace
C08			Nabití kondenzátoru
C09			Start měření
C10			Stop měření
C11			Zjistit nastavení
C12			Odeslání události
C13	char 'z'/'v'		Ovládání relé zapnuto/vypnuto
C14	char 'z'/'v'		Ovládání ventilátoru zapnuto/vypnuto
C15	char 'z'/'v'		Ovládání LED zapnuto/vypnuto
C16			Žádost o naměřená data z paměti
C17			Konec sekvence dat
C18	kladný int	#	Nastavení napětí AK
C20			Požadavek na změřenou hodnotu z AK, zakončena "#"
C21			Kalibrace iontmetru, po dokončení odpověď "#"

```
Čas: 18.5.2022, 15:45:29, Koncentrace iotů: 10375, Šířka: 49.226001,
Délka: 16.575705, Výška: 306.900, Napětí baterie: 0.66, Napětí na desce:
4.99
Čas: 18.5.2022, 15:45:35, Koncentrace iotů: 10375, Šířka: 49.226001,
Délka: 16.575705, Výška: 306.900, Napětí baterie: 0.66, Napětí na desce:
4.99
```

Obrázek 12.3 Příklad zapsaných dat v textovém souboru

12.3 Měření iontů

Na navrhovaném programu slouží pro měření iontů a jejich zápis funkce `measureIons()`. Její vývojový diagram můžeme vidět níže.

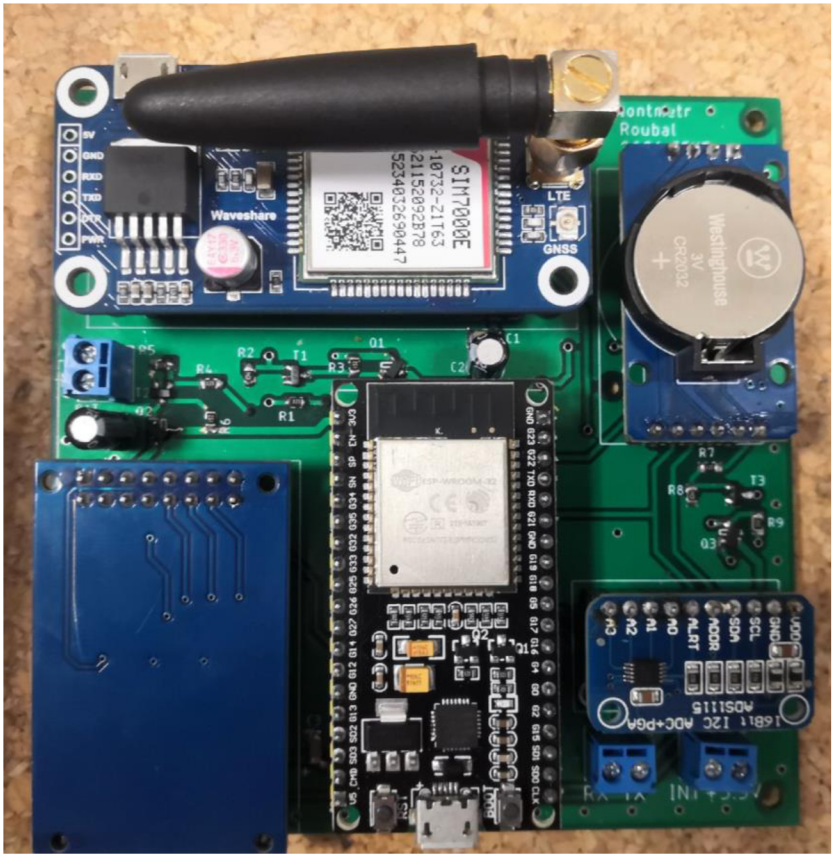


Obrázek 12.4 Vývojový diagram funkce measureIons()

Nejdříve dojde k odeslání příslušných nastavení pomocí C příkazů. Pak, zdali je příslušný cyklus ke kalibraci, je kalibrace provedena. Následně je zahájeno měření a vstoupí se do cyklu kde je proveden příslušný počet měření v nastaveném intervalu. Tyto data jsou ukládána přepočítána na koncentraci iontů a spolu s příslušným časem měření uložena do pole.

13. LADĚNÍ DESKY

V této kapitole jsou popsány problémy, které byly odhaleny při kompletaci desky a jejím postupném testovaní a jejich řešení. Dále je také popsáno ladění komunikace s iontmetrem.



Obrázek 13.1 Finální podoba řídící desky

13.1 Chyby v návrhu desky

Na návrhu DPS se vyskytly dvě chyby v návrhu. Jednou z nich bylo využití nevhodných pinu ESP32, které měly sloužit na spínaní tranzistorových switchů. Zvolené piny byly pouze input only, takže řešením bylo drátky propojit tranzistory s jinými piny.

Druhou chybou byly špatně orientované PMOS tranzistory v návrhu. Řešení bez výroby nové desky spočívalo v otočení tranzistorů vzhůru nohama a jejich pootočení a opětovné napájení v této nové orientaci.

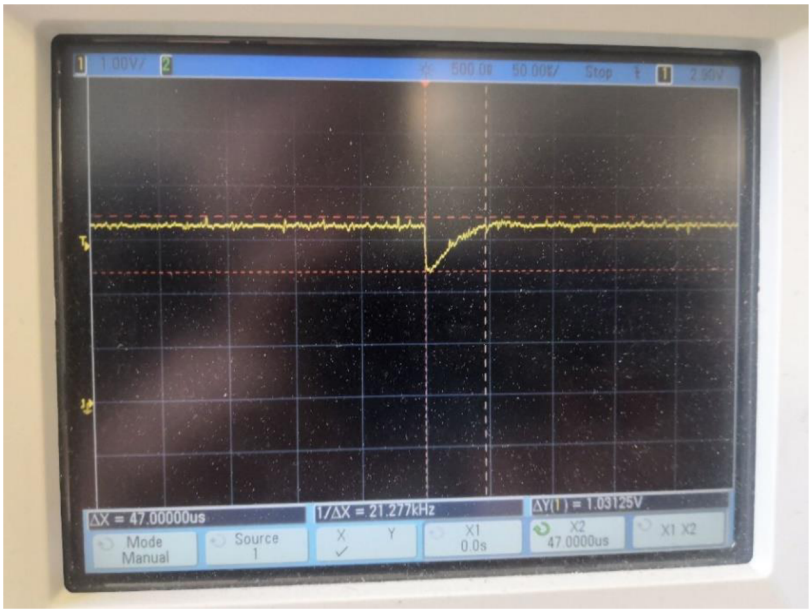
13.2 Problémy s výpisem sériového portu

V průběhu vytváření a ladění finálního programu došlo k problému s výpisem do sériového monitoru na PC, což značně znemožňovalo ověřování správnosti průběhu programu.

Řešením bylo pokaždé po výpisu příkazu na sériovou linku použít funkci `flush()`, která vždy zajistí vyčkávání na dokončení přenosu dat na sériové lince.

13.3 Resetování procesoru

Posledním problémem, který bylo třeba vyřešit, bylo časté samovolné resetování procesoru po zapnutí v důsledku poklesu napájecího napětí procesoru ESP32 (chyba „Brownout detector was triggered“). Jak se nakonec ukázalo příčinou bylo nedefinované chování na stabilizátoru na modulu SD karty, který tyto poklesy způsoboval. Bylo totiž přítomno napětí na jeho výstupu bez potřebného napětí na jeho vstupu. Řešením bylo tedy tento stabilizátor odpájet. Nahrazovat jej nebylo třeba jelikož je modul napájen přímo 3.3V, které poskytuje ESP32.



Obrázek 13.2 Změřený pokles napětí 3,3 V procesoru ESP32 pod minimální mez

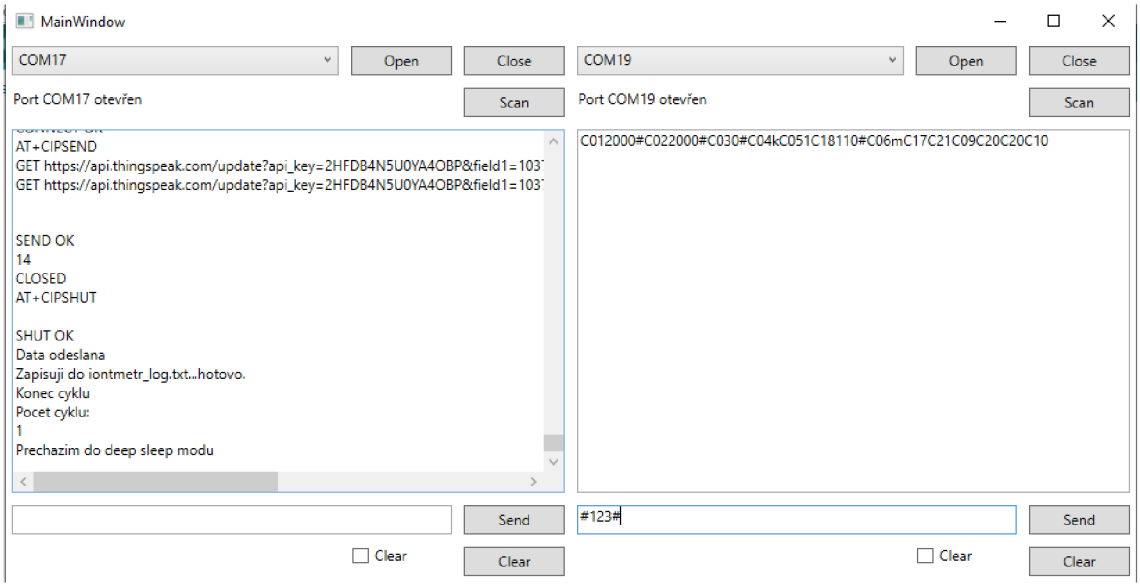
13.4 Měření odběru

Dále bylo provedeno měření odběru desky. Při aktivním režimu a zapnutých modulech odebírala deska celkově necelých 200 mA v závislosti na aktuálně vykonávané činnosti. V případě vypnutí modulu SIM7000 se odběr blížil k udávaných 80 mA pro kmitočet hodin 240 MHz procesoru ESP32. Po vypnutí modulů a přechodu do režimu deep sleep klesl odběr na pouhé 4 mA.

Odběr v aktivním módu by šel dále snížit snížením provozní frekvence mikroprocesoru na 80 MHz, pak je spotřeba blízká 30 mA. V režimu deep sleep je hlavní příčinou vyššího odběru opět nekvalitní lineární stabilizátor. Snížení odběru by šlo dosáhnout přepájením stabilizátoru desky ESP32 za kvalitnější model (předběžně se plánuje nahrazení modelem MCP1825). U stávající elektroniky iontmetru s procesorem ATmega16 se počítá s vypínáním napájecí větve +5 V. Napájení elektrometrického zesilovače se vypínat nebude, protože by se neúměrně prodloužil čas kalibrace nuly iontmetr.

13.5 Ladění komunikace s iontmetrem

K ladění sériové komunikace s iontmetrem byl využit počítač s programem podporujícím sledování dvou sériových linek zároveň. Jedna sériová linka vedla přímo po USB kabelu z mikroprocesoru. Druhá linka, reprezentující desku iontmetru, byla připojena přes USB/UART převodník. Odezva na příkazy odeslané z ESP32 byla poté prováděna v daný čas manuálně odesíláním odpovědí na příkazy zpět přes převodník.

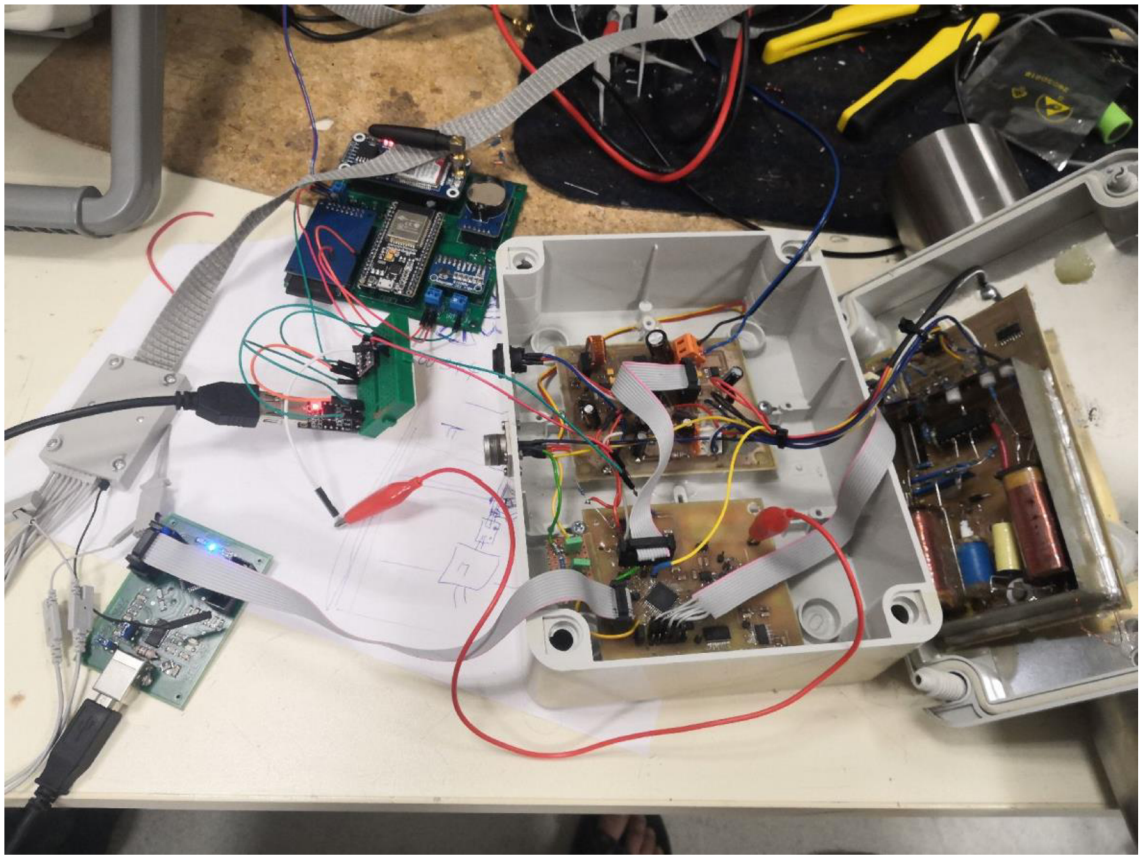


Obrázek 13.3 Ladění sériové komunikace s iontmetrem v monitorovacím programu Adama Ježka [57]

13.6 Testování komunikace s iontmetrem

Na závěr bylo třeba komunikaci nové řídící desky se zbytkem iontmetru otestovat. Prvně byla otestována sériová linka na mikroprocesoru AVR z původní desky a po jejím úspěšném testu byla na mikroprocesor nahrána aktualizovaná verze programu s rozšířeným komunikačním protokolem.

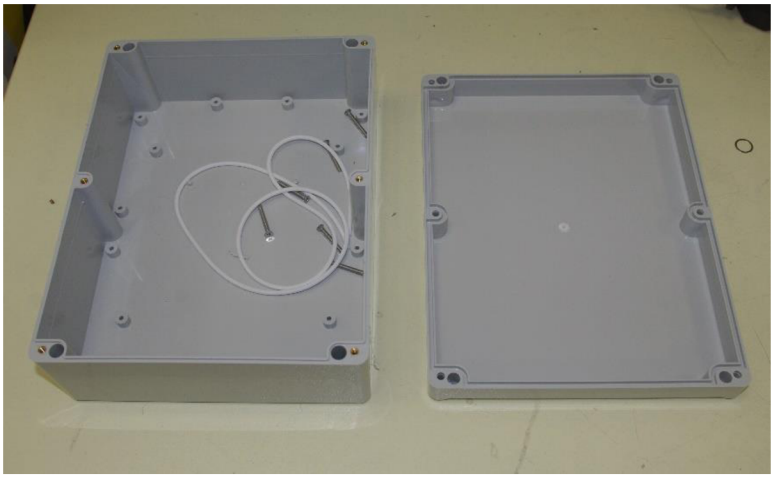
Následně byla nová řídící deska propojena přes sériovou linku UART s původní deskou iontmetru. Pro propojení byl použit logický převodník, jelikož každý z procesorů pracuje na jiné napěťové logické úrovni. Po tomto propojení došlo k úspěšnému vyzkoušení komunikace obou desek.



Obrázek 13.4 Testování komunikace s původní deskou iontmetru

13.7 Mechanické provedení nového iontmetru

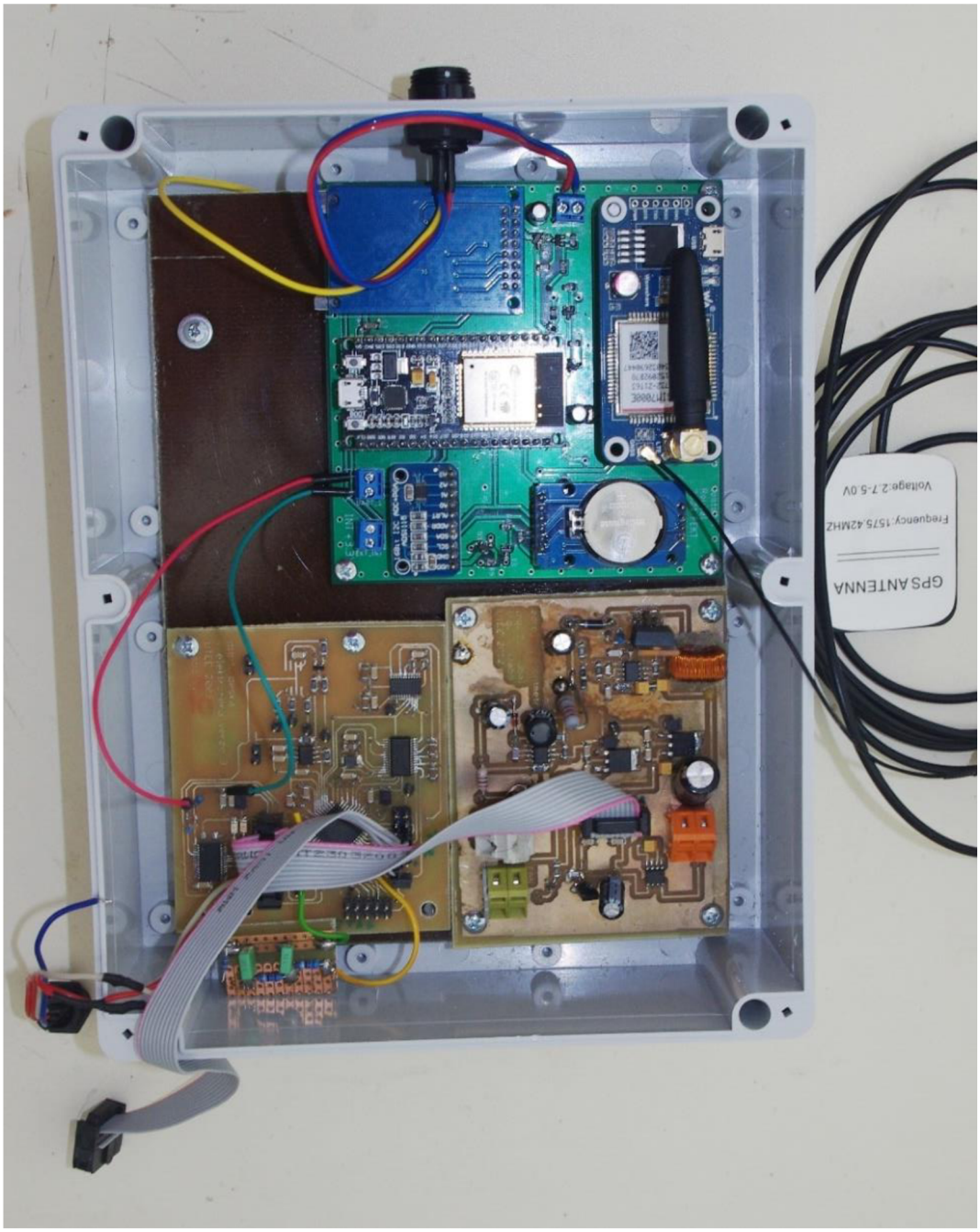
Pro novou variantu iontmetru byla vybrána krabice firmy Kradex Z90JH ABS. Má krytí IP65. Byla již v minulosti ověřena v prostředí jeskyně, kdy bez problémů elektronika vydržela týdenní zaplavení vodou. V této vybrané krabici bude umístěna navržená deska plošných spojů s ESP32 spolu s dvěma původními deskami s napájecím zdrojem a původní elektronikou s ATmegou 16. Nový elektrometrický zesilovač bude použitý z práce Lukáše Zdražila [58].



Obrázek 13.5 vybraná krabička Kradex Z90JH ABS

Na následujícím obrázku je rozložení desek plošných spojů v krabici. Čtečka SD karet bude v konečné verzi umístěna z boku krabice, aby k ní byl přístup bez nutnosti jejího otevření. Napájením bude provedeno vodotěsným konektorem SP1312/P4 WEIPU s power bankou vyvinutou na UTEE. U GPS antény ještě není rozhodnuto, jestli bude uvnitř krabice, nebo se využije možnost vnějšího umístění.

Dále dojde k umístění malé univerzální DPS, která bude obsahovat logický převodník 3.3/5 V pro komunikaci mezi novou a původní částí iontmetru a také tranzistorový switch pro vypínaní 5 V větvě původní části elektroniky.



Obrázek 13.6 Rozmístění desek plošných spojů – v krabici Kradex

14. ZÁVĚR

Cílem práce bylo navrhnout a zrealizovat novou řídící desku iontmetru, která by zastupovala ovládání PC z původní koncepce, umožňovala autonomní a dlouhodobé měření a přispěla by tak k rozvoji mnohaletého výzkumu této oblasti probíhajícího na UTEE.

Tuto desku se podařilo v předcházející semestrální práci navrhnout a v navazující bakalářské práci tento semestr zkonstruovat. Prvně byly vyvinuty funkce pro ovládání jednotlivých komponent a následně byl navržen kompletní řídící program pro procesor ESP32. Následně došlo ke fyzické realizaci desky. Na desce byly odhaleny a úspěšně vyřešeny hardwarové i softwarové problémy. Řídící deska je schopna získat data o poloze, napětí na baterii, aktuálním čase a aktuální koncentraci iontů a tato data je schopna odeslat na pomocí GSM sítě na IoT server a zapsat na kartu SD.

Další částí práce bylo finální zkompletování a proměření iontmetru. Tato část práce nebyla bohužel z časových důvodů plně realizována (logistické problémy se součástkami, lazení desky delší, než se předpokládalo), avšak je v plánu iontmetr v brzké době na UTEE kompletně dokončit a uvést jej do praktického provozu.

LITERATURA

1. ROUBAL, Z. *Běhounkovy výzkumy na poli kosmického záření během expedice vzducholodí Norge a Italia* [Československý časopis pro fyziku]. 68(6). 2018 [cit. 2022-05-30]. ISSN 0009-0700.
2. ROUBAL, Z. dspace.vutbr.cz. In: *Nízkoúrovňová měření* [online]. 23. 3. 2016 [cit. 2021-10-25]. Dostupné z: https://dspace.vutbr.cz/handle/11012/51912
3. KADLČEK, V. dspace.vutbr.cz. In: *Návrh nového iontmetru s bezdrátovou komunikací a meteostanicí* [online]. 5. 6. 2018 [cit. 2021-12-29]. Dostupné z: https://dspace.vutbr.cz/handle/11012/81196
4. MIROSLAV, S. et al. *Experiments with Accuracy of Air Ion Field Measurement*. str. 1001-1005. Cambridge: The Electromagnetic academy, 2008 [cit. 2022-05-30]. ISBN 978-1-934142-00-4.
5. ROUBAL, Z. *Přednáška Vzdušné ionty a nanomateriály*. 15. února 2021 [cit. 2021-11-08].
6. ufa.cas.cz. In: *Atmosférická elektřina a globální elektrický obvod* [online]. [cit. 2021-11-08]. Dostupné z: https://www.ufa.cas.cz/struktura-ustavu/oddeleni-ionosfery-a-aeronomie/atmosfericka-elektrina-a-globalni-elektricky-obvod/
7. KOLMAŠOVÁ, I. youtube.com. In: *Přednáška Nejen na Zemi se blýská* [online]. 9. 1. 2019 [cit. 2021-11-09]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=yzIRhfdWdNI
8. POPEK, M. zonerama.com. In: *Fotografie rudých skřítků* [online]. 1. 9. 2015 [cit. 2021-11-09]. Dostupné z: https://www.zonerama.com/brahe/Photo/5118608/175878382
9. ŽÁK, M. in-pocasi.cz. In: *Jak se v Česku detekují blesky?* [online]. 17. 8. 2014 [cit. 2021-11-09]. Dostupné z: https://www.in-pocasi.cz/clanky/teorie/detekce-blesku-18.7.2014/
10. NOVÁK, P. a H. KRYZNAROVÁ. Dlouhodobé charakteristiky konvektivních bouří z pohledu radarových dat a dat detekce blesků [Meteorologické zprávy]. 73(3). 2020, č. 73(3), s. 65-77 [cit. 2022-05-30]. ISSN 0026-1173. Dostupné z: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/reditel/SIS/casmz/assets/2020/CHMU_MZ_3-20.pdf
11. ROUBAL, Z. et al. *Evaluating the Parameters of a Systematic Long-Term Measurement of the Concentration and Mobility …*. 2021 [cit. 2021-05-31]. ISSN 2073-4433. Dostupné z: https://dspace.vutbr.cz/handle/11012/203372

12. LAJČÍKOVÁ, A. szu.cz. In: *Elektroiontové mikroklima* [online]. 13. 11. 2007 [cit. 2021-10-04]. Dostupné z: http://www.szu.cz/tema/pracovni-prostredi/elektroiontove-mikroklima
13. britannica.com. In: *Ionization* [online]. [cit. 2021-11-15]. Dostupné z: https://www.britannica.com/science/ionization
14. lenntech.com. In: *Chemical elements listed by ionization energy* [online]. [cit. 2021-11-15]. Dostupné z: https://www.lenntech.com/periodic-chart-elements/ionization-energy.htm
15. SVOBODA, J. acta.mendelu.cz. In: *Záporné ionty v obytném prostředí* [online]. 7. 12. 2007 [cit. 2021-10-04]. Dostupné z: https://acta.mendelu.cz/pdfs/acu/2008/02/24.pdf
16. BUŘIVAL, Z. old-archiv.avc-cvut.cz. In: *Přednáška Fyziky iontových polí* [online]. 13. 5. 2004 [cit. 2021-10-04]. Dostupné z: https://old-archiv.avc-cvut.cz/akce/ing-zdenek-burival-fyzika-iontovych-poli-vliv-atmosfericke-elektriny-na-fyziologii-a-psychiku
17. SITAR, J. cbks.cz. In: *Vzdušné ionty a naše zdraví* [online]. 2006 [cit. 2021-10-04]. Dostupné z: http://www.cbks.cz/Upice2006/170.pdf
18. ULLMANN, V. astronuklfyzika.cz. In: *Jaderná a radiační fyzika - Ionizující záření* [online]. [cit. 2021-11-15]. Dostupné z: https://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika6.htm
19. porovnani-cisticek.cz. In: *Přirozená ionizace vzduchu* [online]. [cit. 2021-10-04]. Dostupné z: https://www.porovnani-cisticek.cz/ionizace-vzduchu.htm
20. WANG, H. et al. sciencedirect.com. In: *Original Research ArticleStudy on the change of negative air ion concentration and itsinfluencing ...* [online]. 5. 3. 2020 [cit. 2021-11-15]. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351989420300214
21. PLACHETKA, P. fekt.vut.cz. In: *Air ions concentration* [online]. [cit. 2021-11-01]. Dostupné z: https://www.fekt.vut.cz/conf/EEICT/archiv/sborniky/EEICT_2004_sbornik/02-Magisterske_projekty/06-Mikroelektronika_a_technologie/19-xplach03.pdf
22. BARTUŠEK, K. et al. Experiments of Accuracy Air Ion Field Measurement [Piers Online]. 2007, č. 3(8), s. str. 1330-1333 [cit. 2022-05-30]. ISSN: 1931 - 7360.
23. laskarduino.cz. In: *IoT ESP-WROOM-32 2.4GHz Dual-Mode WiFi+Bluetooth rev.1, CP2102* [online]. [cit. 2021-11-01]. Dostupné z: https://www.laskarduino.cz/iot-esp-32s-2-4ghz-dual-mode-wifi-bluetooth-rev-1--cp2102/?gclid=CjwKCAjwoP6LBhBlEiwAvCcthNvbSHerTl-

osKxz5BdHvUvrIrUIKoGLPV-Nfb0Hc8Cg0jcHFFduVRoCXT0QAvD_BwE

24. DAVID, C. diyi0t.com. In: *Arduino Uno Tutorial [Pinout]* [online]. [cit. 2021-11-22]. Dostupné z: https://diyi0t.com/arduino-uno-tutorial/

25. espressif.com. In: *ESP32 Series Datasheet* [online]. [cit. 2021-11-23]. Dostupné z: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf

26. iotdesignpro.com. In: *Various ESP32 Sleep Modes and How to put ESP32 in Deep Sleep Mode* [online]. 9. 1. 2020 [cit. 2021-11-23]. Dostupné z: https://iotdesignpro.com/projects/various-esp32-sleep-modes-and-how-to-put-esp32-in-deep-sleep-mode

27. koofr.eu. In: *History and evolution of memory cards* [online]. [cit. 2021-11-15]. Dostupné z: https://koofr.eu/blog/posts/history-and-evolution-of-memory-cards

28. MediaPeanut. *5 Largest MicroSD Cards available in 2021: Cameras, Android, and more* [online]. 2021 [cit. 2021-08-17]. Dostupné z: https://mediapeanut.com/largest-micro-sd-cards/

29. SOS electronic. *SD nebo microSD? Hlavně ať je to SSD* [online]. 10. 4. 2015 [cit. 2021-08-17]. Dostupné z: https://www.soselectronic.cz/articles/apacer/apacer-sd-nebo-microsd-hlavne-at-je-to-ssd-1683

30. 7dayshop.com. *What's the Difference Between SD, SDHC , SDXC & Micro SD Cards & Their Different Classes & Speeds?* [online]. 6. 10. 2017 [cit. 2021-08-17]. Dostupné z: https://www.7dayshop.com/blog/whats-the-difference-beteween-sd-sdhc-sdxc-micro-sd-cards-and-their-various-class-speeds/

31. apacerus.com. In: *Industrial SDHC/XC 6.1* [online]. 3. 10. 2019 [cit. 2021-08-17]. Dostupné z: http://eflash.apacerus.com/spec/3D/newsd.pdf

32. q4cdn.com. In: *Datasheet microSDvault™ SD 128MB to 8GB* [online]. 2014 [cit. 2021-08-18]. Dostupné z: https://s2.q4cdn.com/000096926/files/doc_downloads/micro_sd(uSD)/DS_NLUSabcdeI-pqrstuvwxyz_microSD_128MB-8GB_STD_1v8.pdf

33. kingston.com. In: *microSDXC memory card Flash Storage Media* [online]. [cit. 2021-18-08]. Dostupné z: https://www.kingston.com/datasheets/SDCIT-specsheet-64gb_en.pdf

34. sdcard.org. In: *Capacity (SD/SDHC/SDXC/SDUC)* [online]. [cit. 2021-11-15]. Dostupné z: https://www.sdcard.org/developers/sd-standard-overview/capacity-sd-sdhc-sdxc-sduc/

35. sdcard.org. *Bus Speed (Default Speed/High Speed/UHS/SD Express)* [online]. [cit. 2021-08-18]. Dostupné z: https://www.sdcard.org/developers/sd-standard-overview/bus-speed-default-speed-high-speed-uhs-sd-express/

36. techadvisor.com. *What is SD Express?* [online]. 13. 8. 2018 [cit. 2021-08-18]. Dostupné z: https://www.techadvisor.com/news/storage/what-is-sd-express-3682258/

37. svethardware.cz. In: *Micron 5210: první SSD s paměťmi QLC přichází* [online]. 22. 5. 2018 [cit. 2021-09-28]. Dostupné z: https://www.svethardware.cz/micron-5210-prvni-ssd-s-pametmi-qlc-prichazi/46652

38. flashbay.cz. In: *Co jsou SLC, MLC a TLC?* [online]. [cit. 2021-09-28]. Dostupné z: https://www.flashbay.cz/support/faq/slc-mlc-usb-flash-drives

39. unipi.technology. In: *Jaké jsou rozdíly mezi typy paměťových karet a proč je důležité je znát?* [online]. 30. 10. 2020 [cit. 2021-09-28]. Dostupné z: https://www.unipi.technology/cs/novinky/jake-jsou-rozdily-mezi-typy-pametovych-karet-a-proc-je-dulezite-je-znat-371

40. SLIWA, C. a T. ERICKSON. searchstorage.techtarget.com. In: *TLC flash (triple-level cell flash)* [online]. 2017 [cit. 2021-10-02]. Dostupné z: https://searchstorage.techtarget.com/definition/TLC-flash-triple-level-cell-flash

41. cactus-tech.com. In: *SLC, pSLC, MLC and TLC Differences - Does Your Flash Storage SSD Make the Grade?* [online]. 22. 6. 2017 [cit. 2021-09-28]. Dostupné z: https://www.cactus-tech.com/resources/blog/details/slc-pslc-mlc-and-tlc-differences-does-your-flash-storage-ssd-make-the-grade/

42. kingston.com. In: *Difference between SLC, MLC, TLC and 3D NAND in USB flash drives, SSDs and Memory cards* [online]. 2021 [cit. 2021-09-28]. Dostupné z: https://www.kingston.com/czech/en/solutions/pc-performance/difference-between-slc-mlc-tlc-3d-nand

43. soselectronic.cz. In: *SD nebo microSD? Hlavně ať je to SSD* [online]. 10. 4. 2015 [cit. 2021-09-28]. Dostupné z: https://www.soselectronic.cz/articles/apacer/apacer-sd-nebo-microsd-hlavne-at-je-to-ssd-1683

44. rs-online.com. In: *Are you using the right SD card?* [online]. 21. 11. 2017 [cit. 2021-09-28]. Dostupné z: https://www.rs-online.com/designspark/are-you-using-the-right-sd-card

45. atpinc.com. In: *SD Card Requirements for Mission-Critical Applications* [online]. 8. 4. 2020 [cit. 2021-09-28]. Dostupné z: https://www.atpinc.com/blog/industrial-sd-cards-factors-requirements-to-consider

46. OpenLab Pro. *Interfacing Microcontrollers with SD Card* [online]. [cit. 2021-08-17]. Dostupné z: https://openlabpro.com/guide/interfacing-microcontrollers-with-sd-card/

47. ElectronicCircuitsDesign.com. *SD MicroSD Card pinout* [online]. [cit. 2021-08-17]. Dostupné z: https://www.electroniccircuitsdesign.com/pinout/sd-microsd-card-pinout.html

48. elm-chan.org. *How to Use MMC/SDC* [online]. [cit. 2021-08-17]. Dostupné z: http://elm-chan.org/docs/mmc/mmc_e.html

49. cactus-tech.com. In: *An Introduction To SD Card Interface* [online]. [cit. 2021-08-17]. Dostupné z: https://www.cactus-tech.com/wp-content/uploads/2019/03/An-Introduction-To-SD-Card-Interface.pdf

50. STEHLÍK, P. root.cz. In: *ESP32 je tu. Co přinese nástupce ESP8266?* [online]. 1. 9. 2016 [cit. 2021-11-01]. Dostupné z: https://www.root.cz/clanky/esp32-je-tu-co-prinese-nastupce-esp8266/

51. soselectronic.com. In: *AP-ISD256CS2A-8T | APACER* [online]. [cit. 2021-11-15]. Dostupné z: https://www.soselectronic.com/products/apacer/ap-isd256cs2a-8t-320646

52. www.laskarduino.cz. In: *SD Card modul SPI* [online]. [cit. 2021-11-21]. Dostupné z: https://www.laskarduino.cz/sd-card-modul-spi/

53. laskarduino.cz. In: *WaveShare SIM7000E eMTC EDGE GPRS GNSS, HAT Modul pro Raspberry Pi* [online]. [cit. 2021-11-01]. Dostupné z: https://www.laskarduino.cz/waveshare-sim7000e-emtc-edge-gprs-gnss--hat-modul-pro-raspberry-pi/#ratingTab

54. laskarduino.cz. In: *RTC Hodiny reálného času DS3231 AT24C32* [online]. [cit. 2021-11-01]. Dostupné z: https://www.laskarduino.cz/arduino-rtc-hodiny-realneho-casu-ds3231-at24c32/

55. dratek.cz. In: *I2C AD převodník ADS1115 16 Bit ADC 4 kanály s programovatelným zesílením* [online]. [cit. 2021-11-22]. Dostupné z: https://dratek.cz/arduino/2955-i2c-ad-prevodnik-ads1115-16-bit-adc-4-kanaly-s-programovatelnym-zesilenim.html

56. waveshare.com. In: *SIM700 Hardware Design* [online]. [cit. 2021-12-29]. Dostupné z: https://www.waveshare.com/w/upload/6/61/SIM7000_Hardware_Design_V1.04.pdf

57. JEŽEK, A. Lekce 14 - Arduino - Komunikace přes Bluetooth. [cit. 2022-05-30]. Dostupné z: https://www.itnetwork.cz/hardware-pc/arduino/komunikace-pres-bluetooth-arduino

58. ZDRAŽIL, L. In: *Návrh a optimalizace speciálního nízkoúrovňového zesilovače pro měření vzdušných iontů* [online]. 2020 [cit. 2022-05-31]. Dostupné z: https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/126121

SEZNAM PŘÍLOH

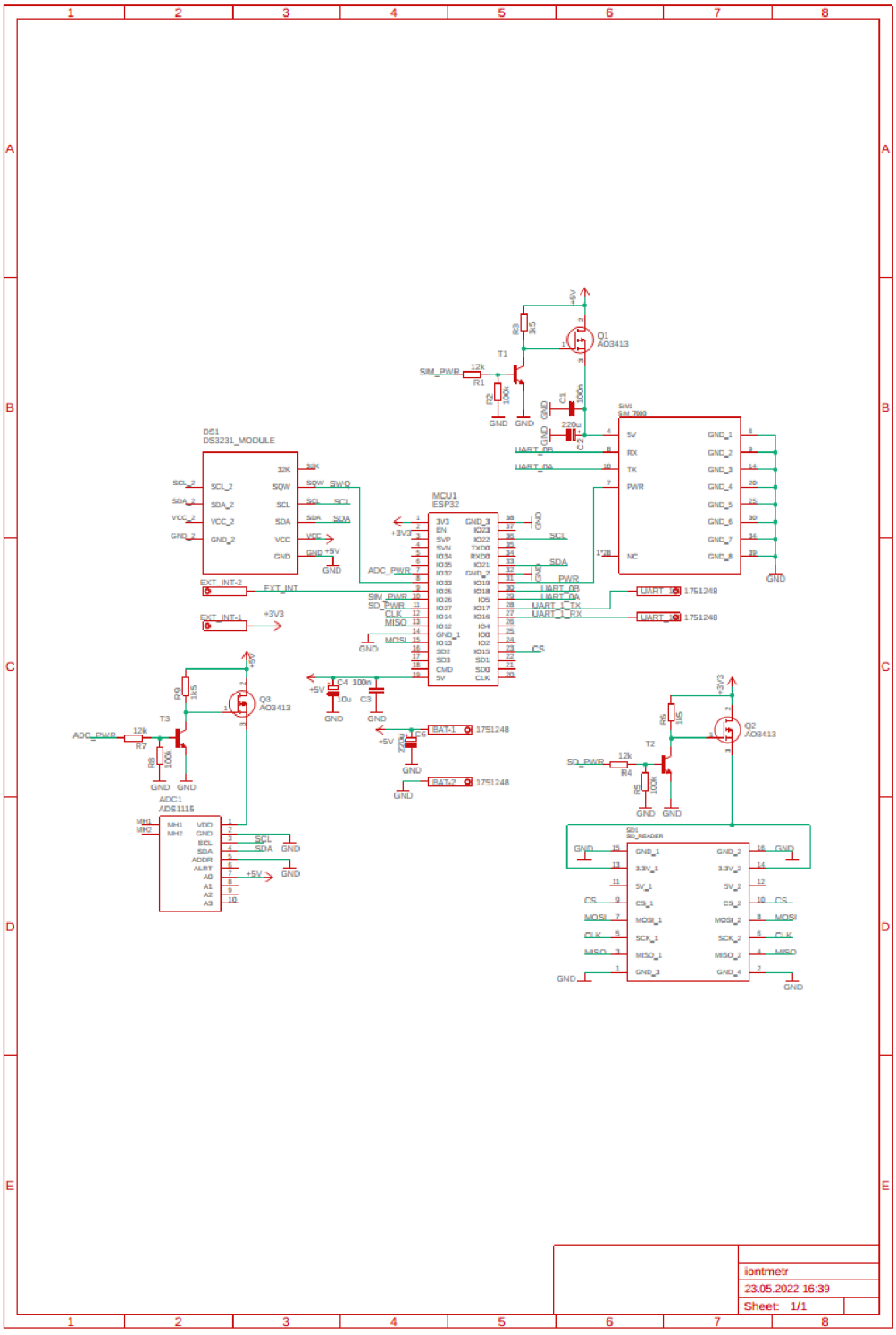
PŘÍLOHA A - SCHÉMA DPS **64**

PŘÍLOHA B - DPS TOP (MĚŘÍTKO 1.5:1) **65**

PŘÍLOHA C - DPS BOTTOM (MĚŘÍTKO 1.5:1) **66**

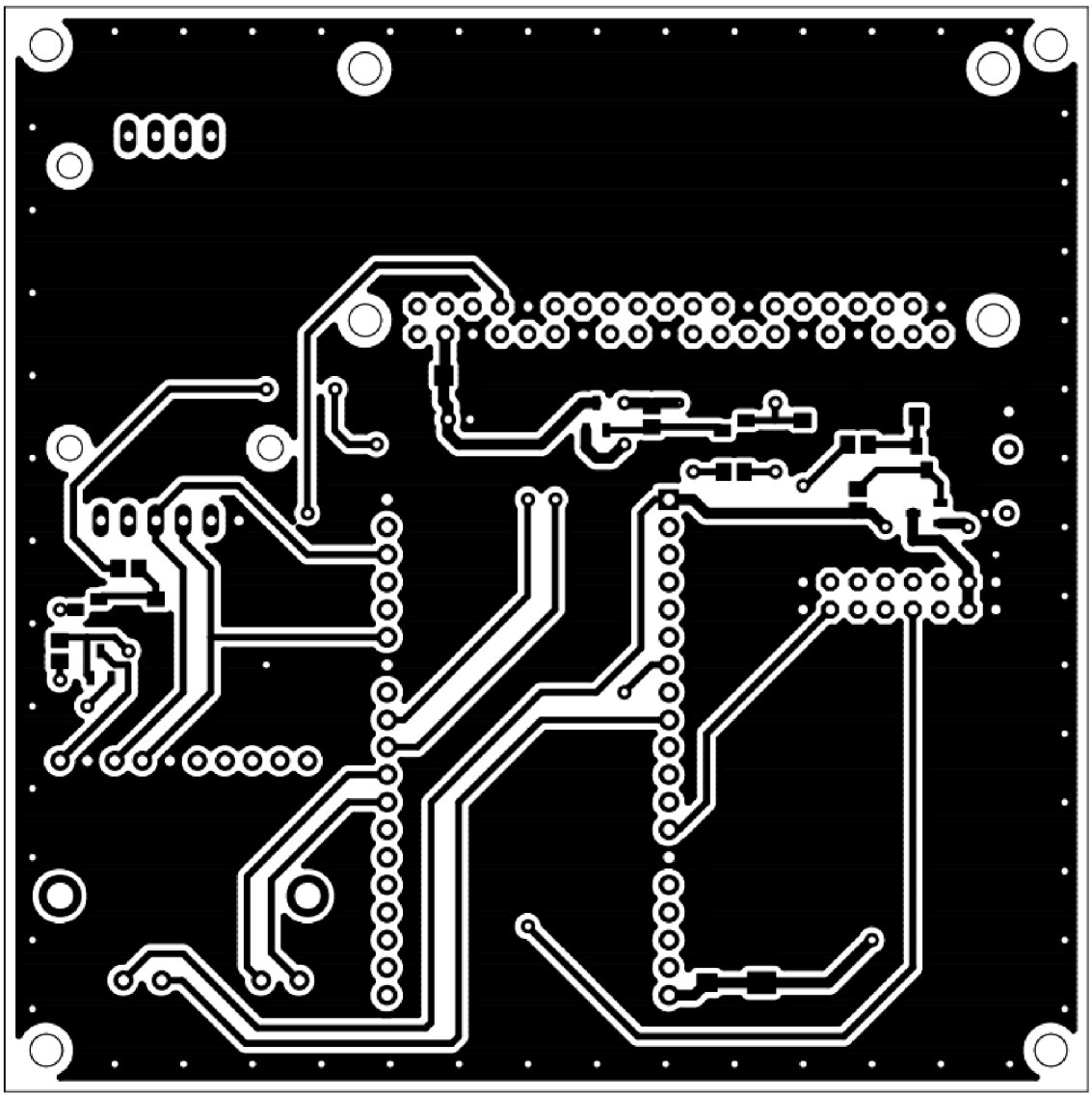
PŘÍLOHA D - DPS SOUPISKA SOUČÁSTEK **67**

Příloha A - Schéma DPS

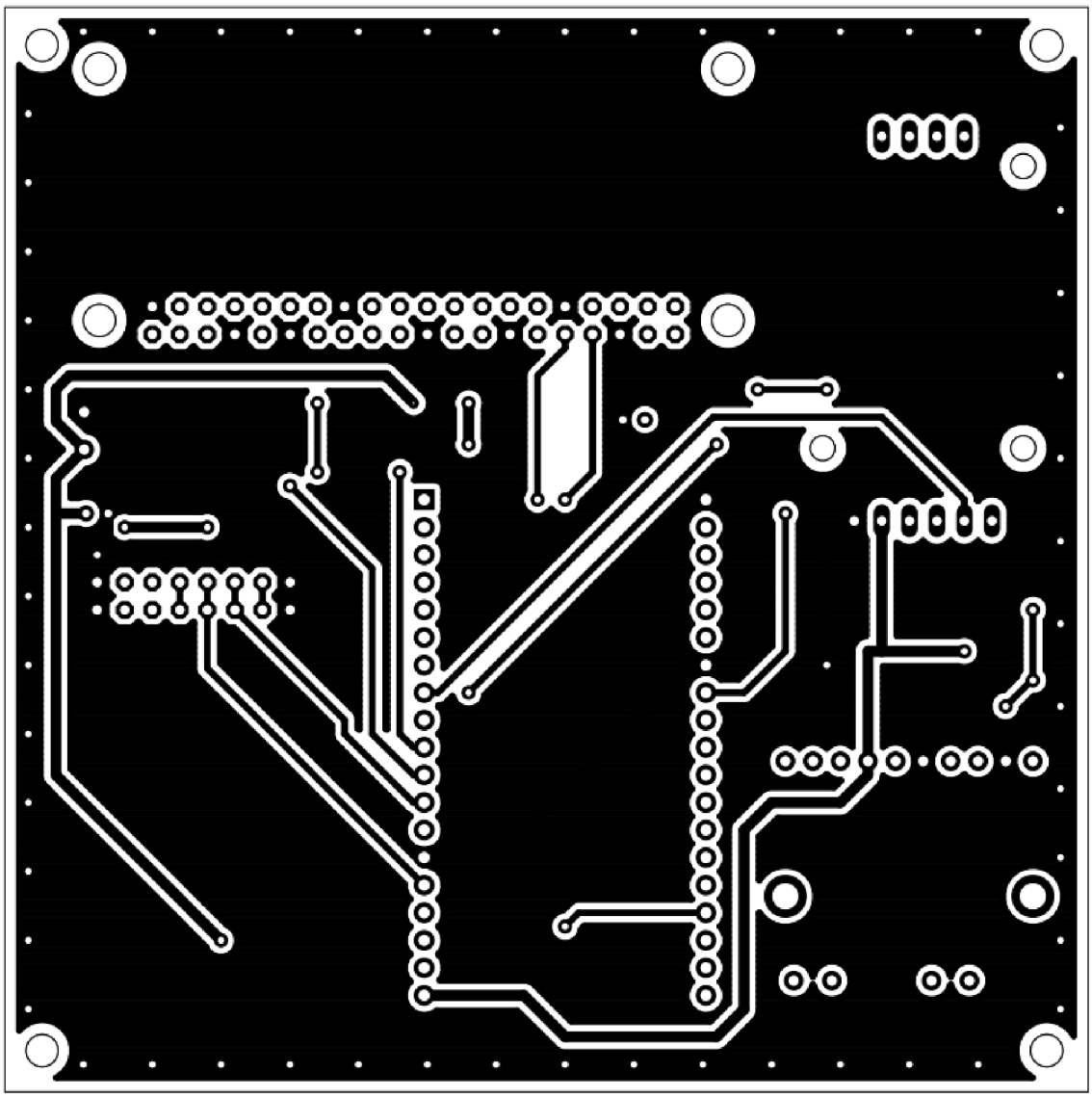


23.05.2022 16:39 E:\Bakalářka\iontmetr\iontmetr.sch (Sheet: 1/1)

Příloha B - DPS Top (Měřítko 1.5:1)



Příloha C - DPS Bottom (Měřítko 1.5:1)



Příloha D - DPS Soupiska součástek

Počet	Součástky	Hodnota	Pouzdro	Popis
3	R2, R5, R8	100k	R0805	SMD rezistor
3	R1, R4, R7	12k	R0805	SMD rezistor
3	R3, R6, R9	1k5	R0805	SMD rezistor
1	C4	10u	B/3528-21R	Tantalový SMD kondenzátor
2	C1, C3	100n	C1206	SMD kondenzátor
2	C2, C6	220u	E2-5	Elektrolytický kondenzátor
3	T1, T2, T3		SOT23	BC817 NPN tranzistor
3	Q1, Q2, Q3		SOT23	IRLML6402 MOSFET P-kanál
1	ADC1			Analogově digitální převodník ADS 1115
1	DS1			Hodiny reálného času DS3231
1	MCU1			Mikroprocesor ESP32 Dev Kit
1	SD1			Čtečka SD karet
1	SIM1			Komunikační modul SIM7000
3	BAT, EXT_INT, UART_1			Svorkovnice na desku, Rozteč 3.5mm
1	SIM1			Kolíková lišta 2x20 MALE
1	SD1			Kolíková lišta 2x8 FEMALE
2	MCU1			Kolíková lišta 1x19 FEMALE
1	ADC1			Kolíková lišta 1x10 FEMALE
1	DS1			Kolíková lišta 1x6 FEMALE
1	DS1			Kolíková lišta 1x4 FEMALE