

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

NÁVRH A KONSTRUKCE MĚŘICÍ APARATURY PRO VÝZKUM BLESKŮ

DESIGN AND CONSTRUCTION OF MEASURING EQUIPMENT FOR LIGHTNING RESEARCH

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ivan Kirsanov

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Zdeněk Roubal, Ph.D.

BRNO 2021

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Telekomunikační a informační systémy**

Ústav telekomunikací

Student: Ivan Kirsanov

ID: 195590

Ročník: 3

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Návrh a konstrukce měřicí aparatury pro výzkum blesků

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Proveďte rešerši metod pro měření elektrostatického pole země. Zaměřte se na kontinuální měření změn elektrostatického pole ve volné krajině. K vybranému senzoru navrhnete vhodný zesilovač a řídicí elektroniku. Je nutné vhodným způsobem odstranit šum a vliv svodových proudů u použitého senzoru. Optimalizujte elektroniku pro minimální spotřebu. Sestavte kompaktní systém s mikrokontrolérem a ukládáním dat na SD kartu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

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

[2] FORT, Ada, et al. A low power measurement system for the atmospheric electric field. In: 2010 IEEE Instrumental Measurement Technology conference Proceeding. IEEE, 2010. s. 1290-1294.

Termín zadání: 1.2.2021

Termín odevzdání: 31.5.2021

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

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
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

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem měřiče elektrostatického pole ve volné krajině. Teoretická část je věnována teorii vzniku elektrostatického pole. V teoretické části jsou také popsány ověřené metody měření. Praktická část semestrální práce je zaměřena na teoretický návrh měřicího přístroje, praktický výběr součástek a zdůvodnění. Součástí práce je blokové schéma zapojení.

Klíčová slova

Měření intenzity, elektrostatické pole, bouřka, atmosférická elektřina, proud iontů, synchronní detekce, synchronní zesilovač.

Abstract

The main aim of this semester work is the design of meter of an electrostatic field in the open landscape. The theoretical part focuses on describing the theory of the creation of an electrostatic field and on proven measurement methods. The practical part of the bachelor's work is focused on the design of a measuring instrument, selection of components and justification. The practical part includes a block diagram of wiring.

Keywords

Intensity measurement, electrostatic field, storm, atmospheric electricity, ion stream, synchronous detector, lock-in amplifier.

Bibliografická citace

KIRSANOV, Ivan. Návrh a konstrukce měřicí aparatury pro výzkum blesků. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/133378>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Zdeněk Roubal.

Citace elektronického zdroje:

KIRSANOV, Ivan. Návrh a konstrukce měřicí aparatury pro výzkum blesků [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-31]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/133378>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Zdeněk Roubal.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	Ivan Kirsanov
VUT ID studenta:	195590
Typ práce:	Bakalářská práce
Akademický rok:	2020/21
Téma závěrečné práce:	Návrh a konstrukce měřicí aparatury pro výzkum blesků

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: 11.12. prosinec 2020

podpis autora

Poděkování

Chci poděkovat vedoucímu semestrální práce panu Ing. Zdeněku Roubalovi, Ph.D. za vědeckou, pedagogickou a odbornou pomoc během této semestrální práce, zejména za snahu mě dovést k lepším výsledkům.

V Brně dne 31.05. květen 2021

podpis autora

OBSAH

Úvod.....	9
1. TEORETICKÝ ÚVOD DO MĚŘENÍ.....	10
1.1 PRINCIP ČINNOSTI ZAŘÍZENÍ MĚŘÍCÍHO SÍLU ELEKTRICKÉHO POLE	11
1.2 PRINCIP ČINNOSTI MĚŘÍCÍHO PŘÍSTROJE VODIVOSTI VZDUCHU	11
1.3 PRAKTICKÁ ČÁST PRÁCE	12
2. NÁVRH.....	13
2.1 VÝBĚR ŘÍDICÍ JEDNOTKY	13
2.2 ÚSPORNÉ MÓDY	14
2.3 NAPÁJECÍ SYSTÉM	15
2.4 NÁVRH AKUMULÁTORU	16
2.5 VÝPOČET SPOTŘEBY PROUDU	16
2.5.1 <i>Spotřeba proudu při měření</i>	16
2.6 DRIVER MOTORU	17
2.7 OPERAČNÍ ZESILOVAČ	17
2.8 NÁVRH FILTRU	20
2.9 ANALOGOVĚ-ČÍSLICOVÝ PŘEVODNÍK	21
2.10 MIKRO SD ČTEČKA	22
2.11 MĚŘICÍ SONDA.....	23
2.12 SYNCHRONNÍ DETEKCE.....	24
2.13 VOLBA SNÍMAČŮ OTÁČEK	25
2.14 MOTOR.....	26
3. MAKETA PRÁCE	28
ZÁVĚR	31
LITERATURA.....	32

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	Vysoké učení technické v Brně

Symboly:

U	napětí	[V]
I	proud	[A]
$A\check{C}P$	analogově číslicový převodník	
FET	unipolární tranzistor	
MOSFET	tranzistor řízený elektrickým polem	
PWM	Pulzně šířková modulace	

ÚVOD

V současné době je měření intenzity elektrostatického pole jedním z důležitých měření v podnikání a cestování. Je podmíněno tím, že předpověď počasí, která zahrnuje bouřky s blesky, hraje významnou roli při startování nosné rakety do mezinárodní vesmírné stanice pro běžný letový provoz občanů. Při cestování do horských oblastí dochází k nehodám v důsledku úderu bleskem. Předpověď počasí tak může zachránit životy a vyloučit možnost hospodářské škody.

V této práci je probrán teoretický návrh měřiče elektrostatického pole. Návrh obsahuje výběr řídicí jednotky s minimální spotřebou a výběr operačního zesilovače a AČ převodníku. Dále je zde rozvinut návrh baterie, která bude schopná napájet měřicí přístroj po dobu 24 hodin a více, a také návrh měřicí sondy.

Celý měřicí systém je uveden v podobě blokového schématu na str. 12.

Všechny výsledky a zvolené komponenty jsou popsány v závěru práce.

1. TEORETICKÝ ÚVOD DO MĚŘENÍ

Experimentální výzkumy elektrického pole v atmosféře byly donedávna omezeny na měření blízko povrchu Země. Tato měření byla prováděna na několika stanicích v průběhu desetiletí. Trvalé průzkumy umožnily objasnit řadu charakteristických rysů chování elektrického pole v povrchové vrstvě a vysvětlit jejich vztah k dalším prvkům atmosférické elektřiny, jako je vodivost atmosféry, proud vzduch–země atd. Bylo zjištěno, že za příznivých povětrnostních podmínek elektrické pole obvykle směřuje tak, jako kdyby Země měla záporný náboj a atmosféra kladný. Střední intenzita pole na úrovni země je asi $130 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$. Během srážek a zejména během bouřek může pole změnit směr a dosáhnout hodnoty přibližně $10\,000 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$. Výsledky průzkumů také ukázaly, že intenzita atmosférického elektrického pole prochází změnami, které probíhají současně po celé planetě.[4]

Měření v různých výškách nad zemským povrchem zároveň ukázalo, že vodivost vzduchu stoupá s nadmořskou výškou, přičemž změna probíhá dle exponenciálního zákona. Intenzita pole se mění také v závislosti na zeměpisné poloze. Střední hodnoty intenzity jsou na rovníku minimální a směrem k mírným zeměpisným šířkám vzrůstají. Tyto skutečnosti a řada dalších jevů byly vysvětleny pomocí teoretických modelů (teorie kulového kondenzátoru). Tato teorie obvykle slouží k vysvětlení chování atmosférické elektřiny. Podle této teorie elektrické pole atmosféry existuje díky skutečnosti, že záporný náboj Q^- je koncentrován na zemi a kladný náboj Q^+ v horní vrstvě atmosféry. V daném případě zemský povrch a atmosféra slouží jako kondenzátorové desky. Nabité částice vytvářejí určitý rozdíl potenciálů mezi „deskami“, v důsledku čehož v atmosféře vzniká elektrické pole. Vzhledem k atmosférické vodivosti mezi zemským povrchem a horními vrstvami atmosféry zde proudí elektrický proud I , který má tendenci vybíjet kondenzátor ionosféry a zemského povrchu. Hustota tohoto proudu je konstantní a v závislosti na výšce se rovná

$$I_d = E_h \times \lambda_h, \quad (1)$$

kde E_h je pole a λ_h je vodivost vzduchu ve výšce h .

Atmosférické pole by se mělo zmenšovat s nadmořskou výškou podle exponenciálního zákona, protože vodivost, jak je uvedeno výše, se s nadmořskou výškou zvyšuje dle exponenciálního zákona. Například vodivost ve výšce 6 km je přibližně 10krát vyšší než na zemském povrchu, kde elektrické pole bude pouze 10%. [4]

V obyčejný den se nad rovnou pouštní zemí nebo nad mořem ve směru od povrchu země zvyšuje elektrický potenciál přibližně o 100 voltů na metr. Existuje tedy vertikální elektrické pole $E = 100 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$. Polarita pole odpovídá zápornému náboji na zemském povrchu. [10]

Mezi molekulami vzduchu existují ionty – molekuly kyslíku, které získaly elektron navíc nebo jeden ztratily. Tyto ionty nezůstávají jako jednotlivé molekuly, protože kvůli

svému elektrickému poli mají tendenci shromažďovat kolem sebe několik dalších molekul. Tyto lehké vzdušné ionty jsou unášeny elektrickým polem – pohybuje se pomalu nahoru nebo dolů – a vytváří proud.

Existuje několik způsobů, jak takové pole změřit. Jedním ze způsobů je umístit izolovaný vodič do určité vzdálenosti nad zemí a nechat ho tam, dokud nebude mít stejný potenciál, jako má vzduch. Pokud ho tam necháme dostatečně dlouho, velmi malá vodivost ve vzduchu bude přitahovat náboje na vodič, dokud ten nedosáhne potenciálu okolního prostředí. Pak jej můžeme snést zpět na zem a změřit změnu jeho potenciálu.

Rychlejší způsob je použít jako vodič nádobu s vodou s malým únikem. Při kondenzování odvádí voda přebytečné náboje a nádoba se přiblíží ke stejnému potenciálu jako vzduch. Potenciál nádoby pak změříme multimetrem.

Intenzitu lze měřit také pomocí toku iontů v atmosféře. Hustota proudu je velmi malá – každý metr čtvereční protíná asi 10 pA paralelně se zemí. Vzduch není dokonalý izolátor a kvůli této vodivosti vytváří v elektrickém poli malý proud. [10]

1.1 Princip činnosti zařízení měřícího sílu elektrického pole

V zařízení typu elektrostatického fluxmetru se síla elektrického pole převádí na elektrický proud pomocí rotačního elektrostatického generátoru, který je založen na jevu elektrostatické indukce. Tok elektrostatické indukce měřeného pole indukuje elektrický náboj na měřicí desce. Modulátor – stínící deska – pravidelně stíní měřicí desku v elektrickém poli, díky čemuž se hodnota indukovaného náboje periodicky mění. Náboj proudící do desky a ven z desky vytváří proud v zatěžovacím obvodu. Amplituda tohoto proudu je úměrná síle měřeného elektrického pole, frekvenci otáčení modulační desky a ploše měřicí desky, fáze je určena směrem elektrického pole na povrchu měřicí desky.

1.2 Princip činnosti měřícího přístroje vodivosti vzduchu

Měření elektrické vodivosti vzduchu se provádí metodou aspiračního kondenzátoru. Vzduch je nasáván přes měřicí kondenzátory nasávání pomocí turbodmyhadla, jehož elektrická vodivost je měřena. Pod vlivem napětí přiváděného mezi deskami kondenzátoru (rotoru) proudí elektřina do sběrné desky (senzoru). Hodnota tohoto proudu je úměrná hodnotě polární elektrické vodivosti. Elektrický proud protékající měřicím odporem zesilovače se převádí na napětí, které se přivádí z výstupu zesilovače do nízkofrekvenčních filtrů a poté do výstupního konektoru.

1.3 Praktická část práce

Měřicí přístroj se skládá z měřicí sondy, operačního zesilovače, synchronního zesilovače, filtru typu dolní propust, analogového číslicového převodníku, mikrokontroléru, čtečky SD karty, SD karty, powerbanky, motoru a kontroleru motoru .

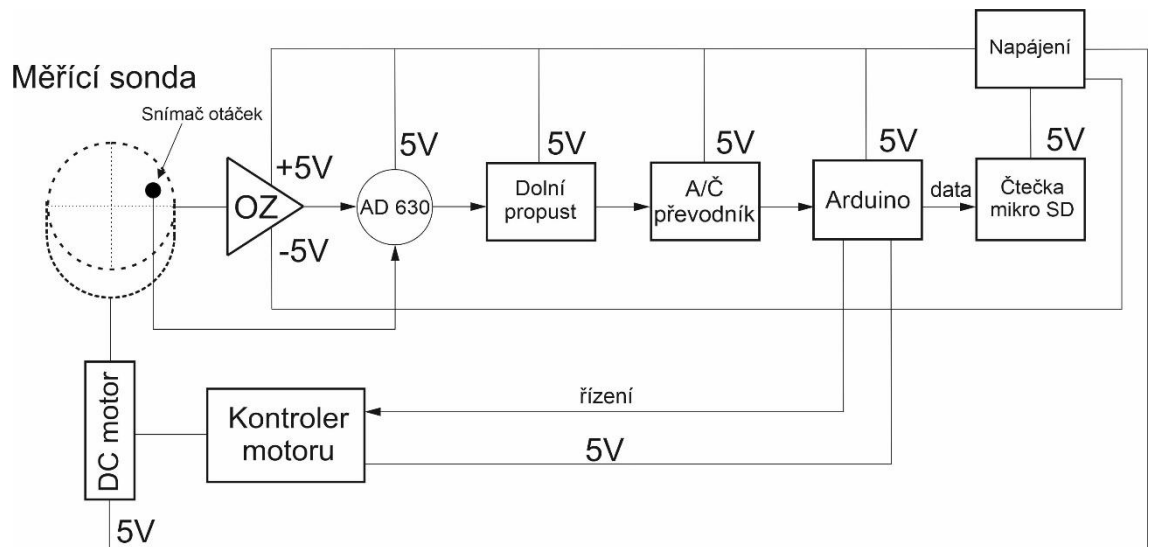
Měřicí sonda se skládá z rotoru a statoru.

Blokové schéma měřicího přístroje, viz obr. 1.3.1.

Pro zesílení signálu bude zvolen operační zesilovač, který má relativně velký rozsah napájecího napětí, 4,85 až 18 V, a malou proudovou spotřebu.

Pro roztočení vrtule bude zvolen stejnosměrný kartáčový motor, který má malé napájecí napětí, 3–5 V, proud naprázdno co nejmenší ideálně pod 0,07 A.

Celý měřicí přístroj bude napájen z powerbanky, jelikož v měřicím přístroji bude motor, který bude odebírat víc proudu. Velká kapacita powerbanky zajistí dlouhou činnost.



Obr. 1.3.1: Blokové schéma měřiče

2. NÁVRH

2.1 Výběr řídicí jednotky

Jednočipový počítač (mikrokontrolér, MCU) je většinou monolitický integrovaný obvod obsahující kompletní mikropočítač. Jednočipové počítače se vyznačují velkou spolehlivostí a kompaktností, proto jsou určeny především pro jednoúčelové aplikace. Příkladem jednoúčelové aplikace v rámci této semestrální práce je měřicí soustava pro měření intenzity elektrostatického pole.

Raspberry Pi je jednočipový počítač, který je se stolním počítačem srovnatelný, pokud jde o více možností použití, ale ne však z hlediska výkonu. Obsahuje vývod pro monitor (HDMI), přes USB je možné připojit klávesnici a myš. Použitý mikroprocesor je z rodiny ARM, takže je na úrovni běžného smartphonu nebo velmi starého počítače. Na počítači Raspberry Pi je možné vytvářet okénkové aplikace pro různé účely včetně databáze pro měření.

Na rozdíl od Arduina je možné Raspberry Pi použít nejen k ovládání různých zařízení, ale i k samotnému vývoji příslušných aplikací. Lze ho též použít jako multimediální server pro okamžité sledování měření intenzity a odesílání na vzdálený server přes internet.

V dnešní době trh nabízí velký výběr řídicích jednotek pro návrh měřicích přístrojů. Příkladem takových jednotek můžou být Raspberry Pi a jeho verze jako 3A, 3B, 3B++ a nová 4B. Méně výkonným příkladem je Arduino a jeho verze Nano, Uno, Mega či Leonardo.

Podle požadavků semestrální práce musí mít celý přístroj minimální spotřebu. Raspberry Pi má spotřebu proudu 300 mA, proto byl návrh s tímto počítačem zamítnut. Alternativou k Raspberry Pi je řada mikrokontrolérů Arduino.

Základní částí měřicího přístroje je jednodeskový počítač Arduino Uno založený na mikrokontroléru Microchip Atmega 328P od firmy Atmel. Tento počítač byl zvolen, protože usnadňuje práci při programování a řízení ostatních komponentů.

Arduino Uno má spotřebu proudu buď 43 mA, anebo 48 mA, záleží na modelu a napájecím napětí. Nevýhoda Arduina Uno je v tom, že tento vývojový modul má relativně velké rozměry. Arduino Mega má oproti tomu více I/O pinů a velkou proudovou spotřebu, 43 mA při 5V nebo 90 mA při napájení 9V.

Arduino Nano představuje zlatý střed a kompromis, neboť má dost I/O pinů pro budoucí modernizaci a minimální spotřebu proudu – 40 mA při napájení 9 V. Tento mikrokontrolér je vzhledem k požadavku na minimální spotřebu mnohem vhodnější, ale tato verze Arduino Nano má malou Flash paměť jenom 32 KiB, viz tab. 1, proto program by měl být napsán co nejstručněji.

Vzhledem k nízké spotřebě je možné použít klon Arduino Nano, který má spotřebu pouze 25 mA. Ale problém klonů je, že vyžadují dodatečné ovladače a kvalita konektorů je horší.

Arduino je možné nastavit tak, aby měřil jen například 1x za 10 min po 1 min a mezi tím uspával mikroprocesor a neměl zapnutý motor rotoru. Toto je možnost programového nastavení Arduina pro úsporu energie.

Nedostatek komponentů u Arduina je možné eliminovat dokoupením modulu z obchodu Arduina, jako je ethernet shield pro webový server.

Tab. 2.1.1: Porovnání charakteristik Arduino desek.

Arduino deska	Mikrokontrolér	Flash paměť KiB	Digitální I/O piny	Analogové vstupy
Uno R3	ATmega328P	32	14	6
Nano	ATmega328	32	14	8
Mega	ATmega1280	128	54	16
Mega2560	Atmega2560	256	54	16
Leonardo	Atmega32u4	32	14	6

2.2 Úsporné módy

Pro úsporu energie existují dvě knihovny External Wake-Up a Timed Wake-Up.

Knihovna External Wake-Up aktivuje Arduino pokud je zmáčknuto tlačítko, což v našem případě není vhodné, jelikož se předpokládá autonomní měření.

Knihovna Wake-Up dovoluje probudit Arduino programově. Tato knihovna vyhovuje požadavku autonomní práce, ale ostatní komponenty Arduina stále budou fungovat, proto má smysl použít režim Deep Sleep Mode. Tento režim se dá aktivovat pomocí přerušení ve zdrojovém kódu. Tato pomocná metoda pomůže snížit proud na 0,57 mA.

Čip ATmega 328P běží standardně na frekvenci 16 MHz, zpomalením na 8 MHz se sníží proud z 12 mA na 8,5 mA. Pro naši aplikaci lze uvažovat i použití frekvence 1 MHz.

Idle Mode – v tomto módu je procesor pozastaven, ale zbytek periférií - SPI, USART, analogový komparátor, sběrnice TWI (I2C), časovače/čítače, časovač hlídacích psa a systém přerušení - pokračuje v práci. Proto je možné ukončit režim

nečinnosti externím i interním přerušením. Hlavní výhodou tohoto režimu je rychlá reakce na události vedoucí k probuzení MC. Jinými slovy, provádění programu začíná bezprostředně po přechodu z nečinného do provozního režimu.

Power-Down mode je neekonomičtější režim ve všech AVR. V tomto režimu jsou vypnuty všechny vnitřní hodinové signály, respektive se zastaví činnost všech uzlů MK pracujících v synchronním režimu. Jedinými uzly, které v tomto režimu nadále fungují, jsou asynchronní moduly MK: časovač watchdog (pokud je povolen), externí subsystém zpracování přerušení a blok porovnání adres modulu TWI. Probuzení z režimu vypnutí je možné, pokud dojde k resetu (hardware, watchdog, BOD) nebo v důsledku generování následujících přerušení:

- watchdog interrupt;
- přerušení na stejné adrese z rozhraní TWI;
- přerušení změny úrovně (pin change interrupt)
- externí přerušení INT0 a INT1.

Power Save Mode - režim úspory energie identický s režimem vypnutí, ale s jedním rozdílem: v režimu úspory energie může časovač/čítač 2 pokračovat v činnosti v synchronním i asynchronním režimu. Mikrokontrolér může být z tohoto režimu vyveden stejnými událostmi jako v případě použití režimu vypnutí, stejně jako i přerušeními časovače/čítače 2.

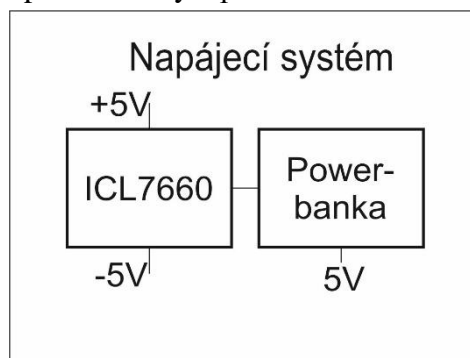
Standby Mode - tento režim se doporučuje používat pouze při použití externího rezonátoru. Je identický s režimem vypnutí, s tím rozdílem, že hodiny nadále fungují. Díky tomu probuzení MK a přechod do provozního režimu vyžaduje pouze 6 cyklů.

Extended Standby Mode je stejný jako předchozí Standby Mode. Tento režim se doporučuje používat ve spojení s externím rezonátorem. Je identický s režimem úspory energie, s tím rozdílem, že hodiny nadále fungují. Díky tomu probuzení mikrokontrolér a přechod do provozního režimu vyžaduje pouze 6 cyklů.

Arduino má vlastní AD převodník, který nebude využit, proto má smysl jej vypnout příkazem `ADCSRA = 0` pro úsporu energie.

2.3 Napájecí systém

Napájení bude složeno z power banky a pomocného obvodu ICL7660.



2.4 Návrh akumulátoru

Výpočet pracovní doby akumulátoru dle vzorce 2.4.1

$$t = \frac{C \cdot 0,7}{I} \quad (2.4.1)$$

Kde, C je kapacita [mA*h], 0,7 je vybíjecí kvocient [-], I je proudový odběr [A]
V pracovním režimu při kapacitě $C = 20000$ mA*h a spotřebě $I = 239$ mA

$$t = \frac{20000 \cdot 0,7}{239} = 58,58 \text{ hodin}$$

V uspaném stavu

$$t = \frac{20000 \cdot 0,7}{23} = 608,70 \text{ hodin}$$

2.5 Výpočet spotřeby proudu

A-Č převodník ADS1115 má spotřebu 0,15 mA.

Arduino Nano má spotřebu 25,00 mA. (16 MHz)

DC motor má spotřebu 500 mA.

Operační zesilovač OPA131 má spotřebu 4,100 mA.

SD karta má spotřebu 23 mA

Celková teoretická spotřeba proudu je $I = 573,25$ mA

2.5.1 Spotřeba proudu při měření

Arduini Nano má spotřebu 23,0 mA (16 MHz)

DC motor je řízen pulzně šířkovou modulací na frekvenci 1000 Hz. Za těchto podmínek motor má proudový odběr 170 mA.

SD karta má spotřebu 21 mA.

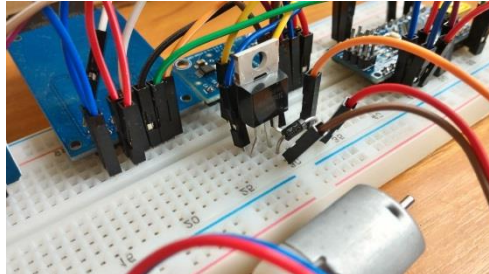
Celková změřená spotřeba v pracovním režimu $I = 239$ mA.

Celková změřená spotřeba v uspaném stavu (vypnutá SD karta) $I = 2$ mA.

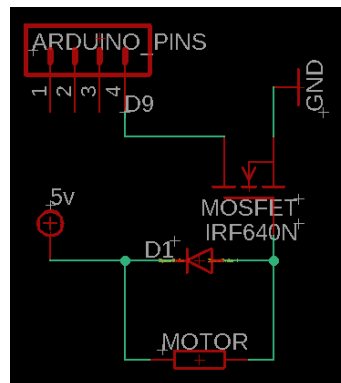
2.6 Driver motoru

Pro řízení motoru byl navržen driver, který se skládá z MOSFET tranzistoru a diody. Zapojení driveru na breadbord viz obr. 2.6.1, schematické zapojení driveru v programu Eagle viz obr. 2.6.2.

Řídicí signál bude poslán z Arduina přes pin D9 na drain MOSFET tranzistoru



Obr. 2.6.1: Zapojení driveru na breadbord



Obr. 2.6.2: Schematické zapojení v Eagle

Motor přes driver je řízen pulzně šířkovou modulací (viz výpis 2.6).

Výpis kódu 2.6: nastavení PWM

```
TCCR1A = (1<<COM1A1) | (0<<COM1A0) | (1<<WGM11) | (1<<WGM10); //WGM 10,11,12,13 - Normal PWM
TCCR1B = (0<<CS12) | (1<<CS11) | (0<<CS10); //1024 prescaler - microseconds asi 1 kHz
OCR1A = 400;
pinMode(pinmotor, OUTPUT);
```

2.7 Operační zesilovač

Operační zesilovač je součástka se dvěma vstupy a jedním výstupem. Značí se jako trojúhelník s výstupem na hrotu a vstupy na protější straně.

U ideálního operačního zesilovače se předpokládá, že má nekonečné zesílení napětí, a to bez ohledu na kmitočet. Nekonečné zesílení ideálního operačního zesilovače totiž jeho vliv zcela potlačí. Pro jednoznačnost se však obvykle uvažuje ideální operační zesilovač jako ideální zdroj napětí řízený napětím s nekonečným zesílením, tj. obvod

s nekonečným vstupním odporem a nulovým výstupním odporem. Předpokládá se dále, že ideální operační zesilovač nemá žádné jiné nežádoucí vlastnosti. [3]

Reálný operační zesilovač si v prvním přiblížení můžeme představit jako diferenční zesilovač napětí s velkým napěťovým zesílením A , s velkým odporem mezi diferenčními vstupy R_i a s malým výstupním odporem R_o .

Pro řešení úkolu měření intenzity v okolí musí mít operační zesilovač malou napěťovou nesymetrii $\pm 0,5$ mV, velmi malý vstupní klidový proud, nízký šum a nízkou nelinearitu, protože signál, který bude dodán do vstupu zesilovače, bude v řádech mikro- až nanoampérů.

V rámci semestrální práce byly zkoumány tři operační zesilovače – INA116, OPA131 a IVC102. INA116 je kompletní monolitický přístrojový zesilovač se vstupem FET s extrémně nízkým zkreslením vstupu. Vstupy a speciální ochranné techniky poskytují vstupní zkreslovací proud 3 fA při 25 °C a pouze 25 fA při 85 °C. Jeho topologie umožňuje nastavení zisků od 1 do 1000 připojením jednoho externího rezistoru. Ochranné kolíky sousedící s oběma vstupními přípojkami mohou sloužit k napájení desek plošných spojů a vstupních kabelů a udržovat extrémně nízký vstupní zkreslený proud. INA116 je k dispozici v šestnáctipólovém plastovém DIP a SOL-16 balíčku pro povrchovou montáž, určeném pro teplotní rozsah -40 °C až 85 °C. [5]

Hlavní problém tohoto zesilovače je to, že se již běžně neprodává.

IVC102 je přesný integrující zesilovač s operačním zesilovačem FET, integrujícími kondenzátory a prepínači FET s nízkým únikem. Integruje nízkoúrovňový vstupní proud po dobu určenou uživatelem a ukládá výsledné napětí do integračního kondenzátoru. Pro přesné měření lze udržovat výstupní napětí. IVC102 poskytuje přesnou alternativu s nízkým šumem k běžným transimpedančním operačním zesilovačům, které vyžadují velmi vysokou hodnotu zpětnovazebního rezistoru.

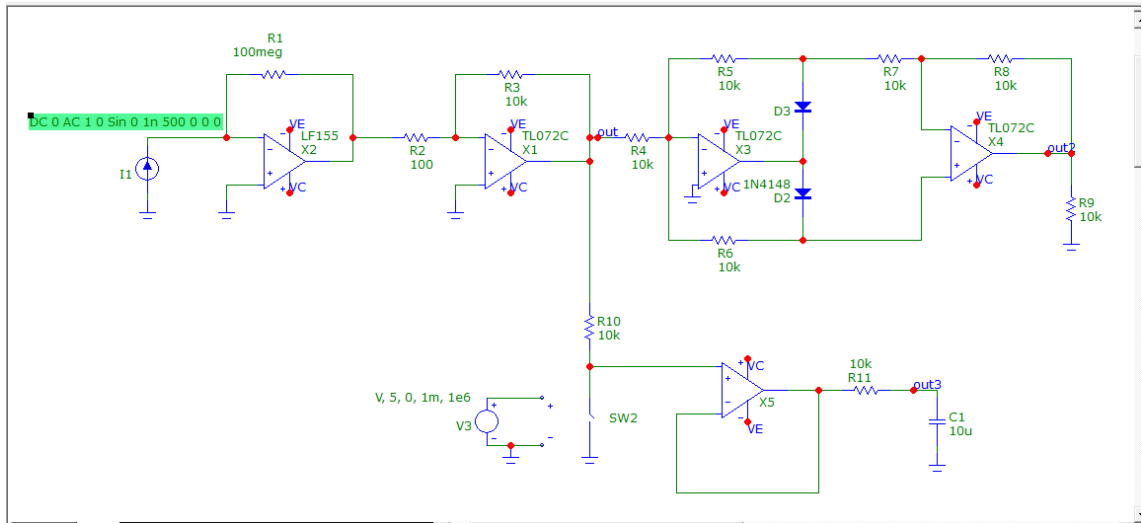
Možnosti pouzdření zahrnují čtrnácti-kolíkové plastové DIP a SO-14 pouzdra pro povrchovou montáž. Oba jsou specifikovány pro průmyslový teplotní rozsah -40 °C až 85 °C. [6]

Série operačních zesilovačů OPA131 se vstupem FET poskytuje vysoký výkon při nízkých nákladech. Řada OPA131 nabízí vynikající univerzální výkon, včetně nízkého offsetového napětí $0,2$ mV, driftu a dobrých dynamických charakteristik. OPA131 je k dispozici v pouzdru DIP a SO. Výkonnostní třídy zahrnují komerční a průmyslové teplotní rozsahy.[8]

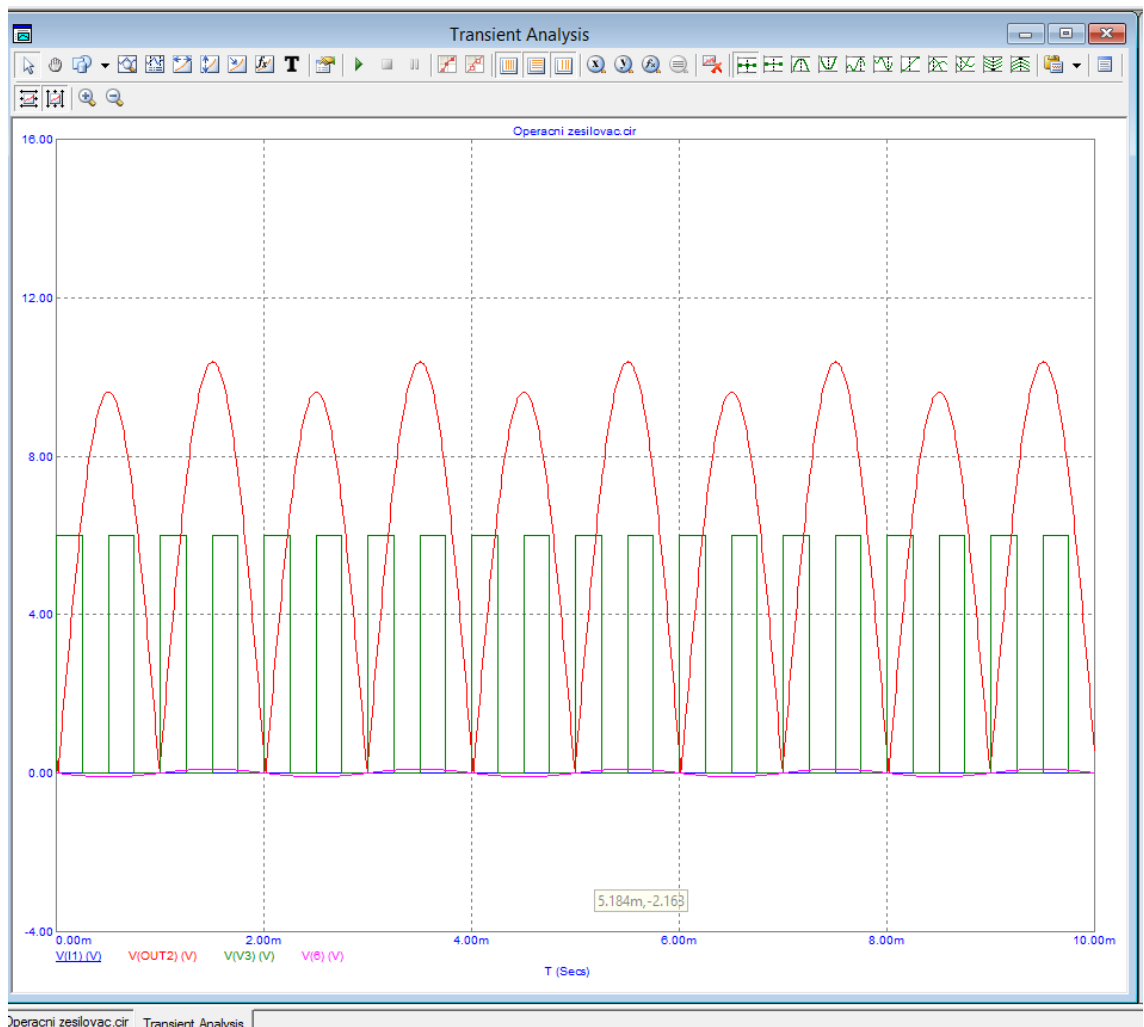
OPA131 má malou napěťovou nesymetrii typicky $\pm 0,2$ mV, maximálně 1 mV a velmi malý vstupní klidový proud typicky 5 pA, maximálně 50 pA, nízký šum a nízkou nelinearitu $0,005$ %. Za těchto podmínek byl tento zesilovač zvolen jako nejvhodnější ze všech uvedených výše.

Vstupní klidový proud se zvyšuje s teplotou. Zmíněný zesilovač byl zvolen, protože podle katalogového listu je velmi citlivý na vstupní signál, což je žádoucí pro zesilování nízkoúrovňových signálů.

Simulace operačního zesilovače. Model OZ LF155 v Microcapu byl upraven dle hodnot OZ OPA131, viz obr. 2.7.1 a obr. 2.7.2



Obr. 2.7.1: Operační zesilovač



Obr. 2.7.2: Průběh napětí

2.8 Návrh filtru

Minimální rychlost ventilátoru pro měření je 2 m/s. [3]

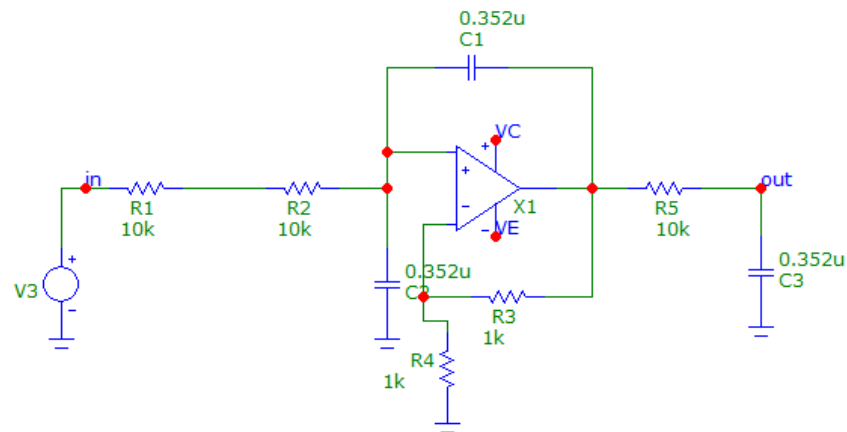
$$v = r * 2 * \pi * f \quad (2.8.1)$$

kde r je poloměr [m], v je rychlost [m/s] a f je frekvence [Hz].

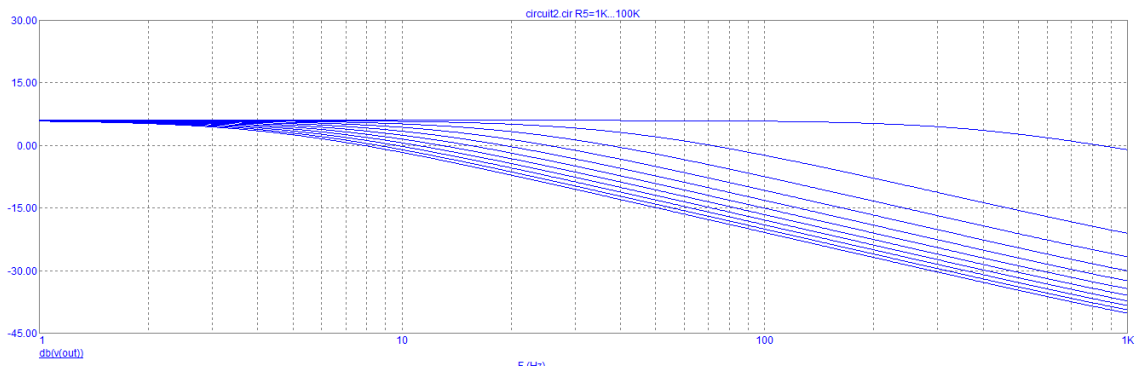
Ze vzorce (2.8.1) lze odvodit minimální frekvenci

$$f = \frac{v}{2 * \pi * r} \quad (2.8.2)$$

Při $r = 0,04$ m je frekvence $f = 7,96$ Hz, z čehož plyne, že šířku pásma pro aktivní filtr typu dolní propust lze zvolit od $f = 16$ Hz jako minimálně požadovanou. V případě, že rychlost ventilátoru bude PWM regulací v programu nastavena vyšší, lze nastavit potřebnou šířku pásma u filtru na větší frekvenční rozsah. Příklad filtru typu dolní propust třetího řádu viz obr. 2.8.1. Příklad krokovaní rezistoru R5 viz obr. 2.8.2.



Obr. 2.8.1: Dolní propust třetího řádu



Obr. 2.8.2: Závislost šířky pásma na resitoru R5

2.9 Analogově-číslíkový převodník

Analogově číslíkový převodník je zařízení, které ze vstupního spojitého signálu vytváří odpovídající číselnou posloupnost na odpovídající výstupní diskrétní číselnou hodnotu.

Výstup může nabývat pouze konečného počtu hodnot, které jsou u většiny převodníků rovnoměrně rozloženy přes celý vstupní rozsah. Existuje tedy konečný počet kvantovacích hladin odpovídající konečné množině stavů číselného výstupu A-Č převodníku. Kvantování znamená v podstatě zaokrouhlení vstupní spojité veličiny na nejbližší kvantovací hladinu s odpovídající číselnou výstupní hodnotou. Vzdálenost kvantovacích hladin se nazývá kvantovací krok. Ten číselně odpovídá váze nejméně významného bitu výstupního číselného kódu.

Výstup analogového číslíkového převodníku je zobrazován na multimetru nebo převeden do vstupu mikrokontroléru pro analýzu.

Analogově číslíkové převodníky se dělí na:

Komparační AČP převádějí okamžitou hodnotu vstupního napětí v určitém časovém okamžiku doby převodu na číslo. Princip převodu vyžaduje, aby vstupní napětí bylo během převodu konstantní, na vstupu tedy musí být paměťový vzorkovač. Tyto AČP bývají rychlé a používají se proto v číslíkových osciloskopech a dalších složitých přístrojích s požadavkem na vysokou rychlost převodu.

Komparační převodník v rámci této semestrální práce není vhodný, neboť se nebude provádět spektrální analýza signálu.

Integrační analogově číslíkové převodníky převádějí průměrnou hodnotu napětí za určitý časový interval na číslo. Výhodou je schopnost potlačení rušivých signálů určitých kmitočtů

Integrační AČP převádějí na číslo průměrnou hodnotu napětí za určitý časový interval. Výhodou je schopnost potlačení rušivých signálů určitých kmitočtů. Jsou z principu pomalejší než komparační převodníky a používají se v multimetrech. [3]

Převodníky se sigma-delta modulací umožňují dosáhnout velmi vysoké linearity převodu při vysokém rozlišení, které dosahuje až 24 bitů. Rychlost převodu je nižší. Skládají se z vlastního Σ - Δ modulátoru a z číslíkového filtru. Modulátor obsahuje filtr typu dolní propust, napěťový komparátor a klopný obvod typu D překlápaný hodinovým signálem s kmitočtem f_r . Dále je zde zpětnovazební větev s jednobitovým ČAP, což je v podstatě přepínač dvouhodnotového signálu $\pm U_R$, který se odečítá od vstupního napětí pomocí rozdílového zesilovače.

U AČP vzniká kvantovací šum, který je rozdělen rovnoměrně v pásmu spektra. Protože se u sigma-delta převodníku vzorkuje s kmitočtem f_r K-krát přesahujícím hodnotu f_V požadovanou vzorkovacím teorémem (5.2), roztáhne se původní spektrální výkon kvantovacího šumu do K-násobně širšího pásma. Číslo K se nazývá koeficient

převzorkování a dosahuje u běžně vyráběných převodníků hodnoty 10 až 10^3 . Následný číslicový filtr odstraní spektrální složky s kmitočtem převyšujícím viz vzorec (2.9.1)

$$\frac{f_V}{2} = \frac{f_r}{(2 \cdot K)}, \quad (2.9.1)$$

čímž se sníží efektivní výkon kvantovacího šumu a tím dojde ke zvýšení efektivního počtu bitů převodníku. Číslicový filtr typu dolní propust průměruje výstupní posloupnost bitů z modulátoru a současně provádí decimaci neboli vybírá každý K-tý vzorek. Výstupem je sériová posloupnost n-bitových slov, která se může dále převést na paralelní tvar. Převodníky s Σ - Δ modulací jsou menší a levnější než odpovídající integrační AČP. [3]

Jako analogový číslicový převodník byl zvolen ADS1115 z webového obchodu arduino-shop.cz. To je převodník typu sigma-delta, jehož výhodou je menší velikost a levnější cena než u integračního převodníku, což je z důvodu kompaktnosti. Tento analogově číslicový převodník má 16-bitové rozlišení a malé napájecí napětí 2 až 5.5 V. Dle katalogového listu je vhodný pro univerzální monitorování napětí a proudu.

2.10 Mikro SD čtečka

Paměť SD karet sestává ze sítě paměťových buněk sloučených do paměťových bloků. Každá buňka obsahuje malý tranzistor se záporně nabitými elektrodami, které jsou propojeny dvojicí nad sebou umístěných hradel. Dolní plovoucí hradlo je izolováno tenkou nevodivou vrstvou a ve výchozím stavu nedrží žádný elektrický náboj. V takovém případě je registrován logický stav jedná 1. Pokud ale do dané buňky náboj při zápisu dat přivedeme, část elektronů proudících mezi elektrodami pronikne do plovoucího hradla skrze izolační vrstvu, kde zůstane "uvězněna". V takovém případě se logický stav buňky změní na 0. Tento proces je reverzibilní a elektrony lze z plovoucího hradla opětovně odvést. Paměť tak lze mazat či přepisovat. Buňky jsou sdruženy do paměťových bloků, při přepisování dat jsou pak všechny buňky daného bloku před zápisem informace nejprve navráceny zpět do logického stavu 1.

Výběr mezi průmyslovou běžnou mikro SD kartou.

Právě s technologií zápisu a přepisování dat souvisí největší nevýhoda paměťových karet, kterou je omezený počet zápisů. Izolační vrstva oxidu je při každém zápisu vystavena silnému náboji, který postupně narušuje její integritu. Pokud je pak karta přepisována velmi často, izolační vrstva ztrácí svou schopnost zadržovat elektrony a dochází tak k únikům náboje z buňky. To způsobuje zmenšování kapacity paměti a může vyústit až ve ztrátu či poškození uložených dat.

Kvůli častému zápisu a vytahování musí karta vydržet mechanické namáhání, proto byla zvolena průmyslová varianta.

Tento požadavek může splnit pouze průmyslová microSD paměťová karta Apacer AP-MSD02GIDI-T. Tato karta má následující charakteristiky, uvedené v tab. 2.

Tab. 2: Charakteristiky microSD karty

Kapacita [GB]	2
Rychlost čtení [MB/s]	19
Rychlost zápisu [MB/s]	14
Provozní teplota [°C]	-40...+85

Mikro SD čtečka bude zakoupena z e-shopu arduino-shop.cz z kompatibilního důvodu. Tato čtečka komunikuje přes standardní SPI rozhraní. Obsahuje 6 pinů – GND, VCC, MISO, MOSI, SCK, CS – a podle datasheetu má napájení 5 V.

Pro ukládání dat byla zvolena běžná mikro SD karta od firmy Transcend. Transcend přichází s novou řadou karet microSDHC Class 10 UHS-I (Premium) odpovídající specifikaci UHS-I (UHS: Ultra High Speed).

Konkrétně tato paměťová karta Transcend microSDHC Class 10 UHS-I (Premium) s dobrou kapacitou 16 GB nabídne vysoké přenosové rychlosti čtení/zápisu s garantovanou minimální rychlostí 10 MB/s dle specifikace odpovídající rychlostní třídě Class 10. Díky tomu je karta vhodná pro moderní chytré telefony, tablety, digitální fotoaparáty s vysokým rozlišením či MPEG4 videokamery pro záznam full HD videa, které kladou značné nároky na záznamová média.

Znalost rychlostní třídy paměťové karty je důležitá pro správnou volbu při využití. Karty se rozdělují do rychlostních tříd, které zaručují minimální garantované přenosové rychlosti – Class 2 (min. rychlost 2 MB/s), Class 4 (4 MB/s), Class 6 (6 MB/s) a Class 10 (10 MB/s). Znalost minimální rychlosti přenosu je nutná zejména pro výběr karty pro nahrávání videa, rychlé fotografování nebo rychlý záznam dat z A-Č převodníku pro sestavení grafu.[5]

Maximální velikost souboru pro 1 hodinu provozu s každou druhou registrací je přibližně 3 MB, což umožňuje nepřetržité pozorování po mnoho dní. To znamená, že v případě potřeby ročního měření při 3 MB denně za jeden rok nebude velikost souboru přesahovat $3 * 365 = 1095$ MB.

2.11 Měřicí sonda

Měřicí sonda je založena na rovnoměrném rozložení elektrického pole mezi dvěma rovnoběžnými deskami s otvory ve tvaru ventilátoru. Dopadající elektrické pole na okraji elektrody však může způsobit zkreslení, což má za následek nerovnoměrné rozdělení. Jako materiál pro senzor byla zvolena nerezová ocel.

Schéma měřicí sondy viz obr. 2.11.1.

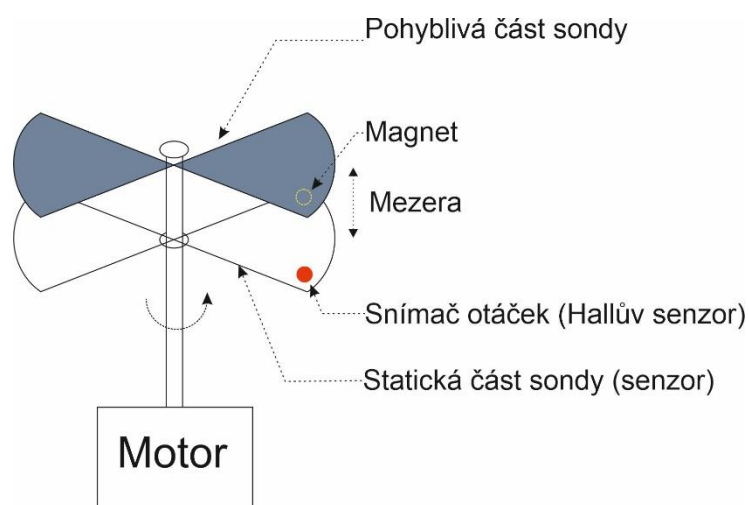
Všechny „field mill“ nástroje mají víceřitový rotor rotující před víceřitou deskou snímače, která je stacionární (tato deska senzoru je stator). Jak se rotor točí, je každá lopatka statoru střídavě vystavena elektrickému poli okolí nebo je před ním chráněna. Po vystavení elektrickému poli je na každé lopatce statoru indukovaný náboj, který je vyloučen (odváděn), když list rotoru zakrývá lopatku statoru. Signál indukovaného proudu je snímán na statoru a je veden do zesilovače a poté do A-Č převodníku.

Při zvětšení šířky mezery indukovaný elektrický náboj klesá a množství změny indukovaného elektrického náboje také klesá. Výzkum ukazuje, že průměrný indukovaný proud klesá s rostoucí mezerovou vzdáleností. Mezera by měla být co nejmenší, aby se zlepšila citlivost. V praxi může umístění snímacích elektrod v blízkosti rotoru způsobit kolize a zvýšit obtížnost procesu montáže. [1]

Pro výpočet celkového množství náboje produkovaného senzorem byl vytvořen předpoklad, že elektrické pole je v každé části konstrukce homogenní. Citlivost snímače lze vyjádřit následující rovnicí (2.11.2)

$$K = \frac{n \cdot S \cdot \epsilon_0}{d} * (E * d) \quad (2.11.1)$$

kde n je počet elektrod; S je povrchová plocha jedné elektrody; ϵ_0 je vakuová permitivita; d je vzdálenost mezi elektrodami a základnou; E je aplikované elektrické pole (V/m).



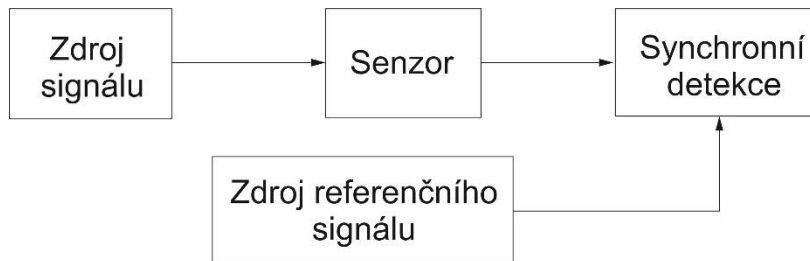
Obr. 2.11.1: Schéma měřicí sondy

2.12 Synchronní detekce

Pokud chceme měřit velmi slabé signály, můžeme pro získání potřebného signálu ze šumu detektoru použít metodu synchronní detekce. Měřený signál namodelujeme s danou frekvencí. Referenční signál smícháme se signálem z detektoru

v synchronním zesilovači. Výsledný signál pak postupuje na filtr typu dolní propust a odfiltrovány signál lze měřit multimetrem nebo zobrazit na osciloskopu.

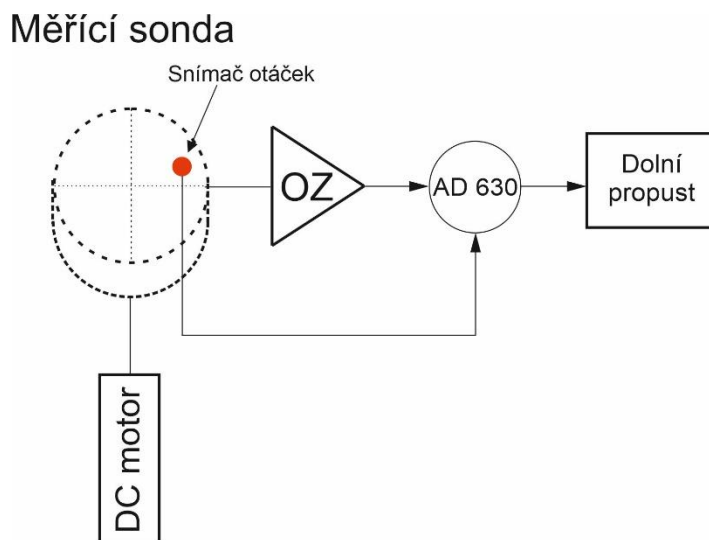
Blokové schéma všeobecné synchronní detekce viz obr. 2.12.1.



Obr. 2.12.1: Blokové schéma synchronní detekce

V rámci této bakalářské práce byla synchronní detekce realizována pomocí Hallove sondy ve zpětné vazbě se synchronním zesilovačem AD630 a aktivním filtrem typu dolní propust 3-řádu, viz obr. 2.12.2

Elektrický signál, který bude vytvářen v měřicí sondě, bude postupovat přes operační zesilovač na synchronní zesilovač AD630. Snímané otáčky z ventilátoru Halovou sondou s určitou frekvencí budou modulovat vstupní signál. Výstupní signál bude následně zpracován v A/D převodníku.



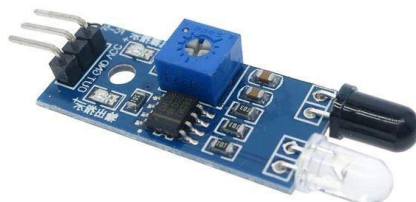
Obr. 2.13.2: Zapojení synchronní detekce

2.13 Volba snímačů otáček

Pro snímání otáček lze použít buď optický anebo magnetický snímač otáček.

Optický snímač se skládá ze zdroje světla a fotodiody. Tento snímač registruje otáčky pomocí světelného paprsku, který se odráží od povrchu sondy a pak dopadá na

fotodiodu. Hlavní nevýhodou tohoto snímače je jeho velikost. Pokud bude namontován z vnější strany, bude velká pravděpodobnost, že bude náhodou zlomen. Pokud ale bude namontován uvnitř sondy (mezi ventilátorem a statorem), vznikne na druhou stranu velká mezera, kvůli které nebude možné provádět měření. Příklad optického snímače otáček viz obr. 2.13.1.



Obr. 2.13.1: Optický snímač otáček

Magnetický snímač nebo Hallův senzor - tento senzor lze využít pro snímání otáček, jestli je nutné na ventilátor doplnit malý permanentní magnet. Hallův senzor bude registrovat vznik magnetického pole během otáčení ventilátoru s magnetem. Toto řešení je vhodnější, protože Hallův senzor dohromady s magnetem potřebují menší místo uvnitř sondy než optický snímač. Příklad Hallůva senzoru viz obr. 2.13.2. Vybral se typ TLV49645 s nízkou spotřebou 1,6 mA v aktivním stavu.



Obr. 2.13.2: Hallův senzor

2.14 Motor

Elektromotor je elektrický stroj, který slouží k přeměně elektrické energie na mechanickou energii.

Motor bude muset roztočit pohybující se část sondy, aby vznikl proud iontů, které budou vytvářet úbytek napětí na zátěži. Pro tento účel je vhodný krokový nebo bezkartáčový stejnosměrný motor.

Krokový motor je speciální synchronní motor pracující synchronně s vstupními impulzy. Jestliže na vstup přijde jeden impulz, rotor se pootočí o určitý úhel (krok) a zastaví se. Až do příchodu dalšího impulzu je poloha rotoru stabilní a neměnná. Přicházejí-li vstupní impulzy postupně, opakuje se s každým impulzem krokové pootočení a zastavení, takže rotor „krokuje“ synchronně s impulzy. Celkový úhel natočení hřídele a rychlost otáčení jsou úměrné frekvenci vstupních impulzů. Při malé

frekvenci vstupních impulsů je chod motoru trhavý, rotor „krokuje“ v rytmu řídicích impulsů. Od určité frekvence je chod motoru prakticky plynulý. Při dosažení maximální pracovní frekvence impulsů je motor na hranici synchronismu a při dalším zvýšení frekvence se zastaví. Krokový motor je schopen synchronně sledovat i skokovou změnu frekvence impulsů nepřesahující jistou velikost; buď naskočí se ztrátou kroků, nebo se nerozběhne. Při skokovém snížení frekvence impulsů pak předběhne synchronní polohu. [3]

Krokový motor je možné řídit pomocí Arduina, což je výhodou, ale tento druh motoru požaduje proud od 0,5 A až do 1,5 A, což zase nesplňuje požadavek na minimální spotřebu.

Bezkartáčový stejnosměrný motor je v elektrotechnice typem synchronního stejnosměrného motoru, který místo komutátoru používá střídač vytvářející pulzy do cívek statoru tak, aby se motor otáčel. Rotor je tvořen permanentními magnety. Problém tohoto motoru spočívá v tom, že má vyšší výkon, než potřebuje měřicí sonda, aby se naindukovalo napětí.

Stejnosemřný motor patří k historicky nejstarším elektrickým strojům. Stejnosemřný motor je ideálním regulačním motorem – jeho otáčky lze plynule měnit změnou přiváděného napětí.

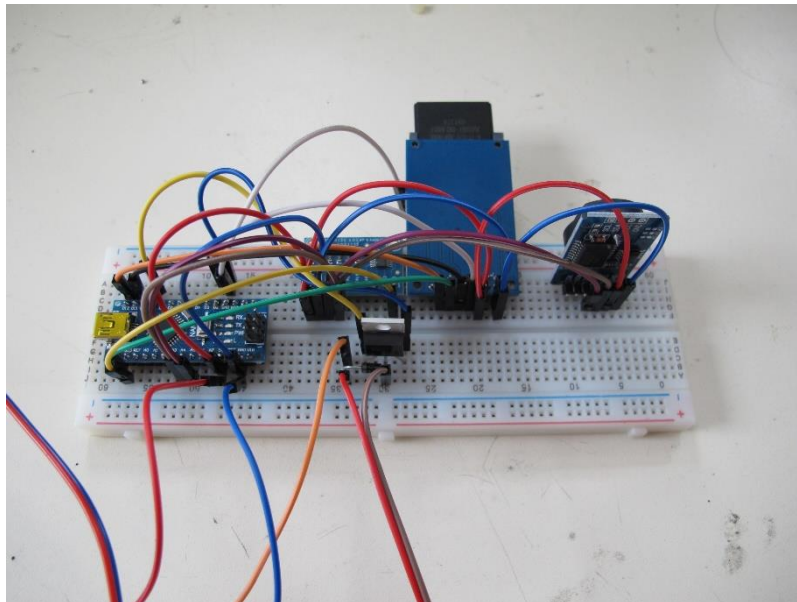
Pro regulované pohony se používají zejména stejnosměrné motory s cizím buzením a motory s buzením permanentními magnety ve statoru. Pro magnety se používají tvrdé magnetické materiály, zejména ferity a spékané materiály ze vzácných kovů, např. samarium-kobalt nebo sloučeniny neodymu, železa a boru. Aktivními částmi stejnosměrného motoru jsou stator se jhem, permanentními magnety a pólovými nástavci z měkkého železa pro koncentraci magnetického toku do vzduchové mezery a rotor (kotva) s vinutím tvořeným jednotlivými cívkami uloženými v drážkách a vyvedenými na komutátor, který spolu s uhlíkovými kartáči a kartáčovými držáky tvoří tzv. sběrací ústrojí. Řez stejnosměrným motorem s permanentními magnety je na obr. 5.1.

Kromě motorů s permanentními magnety se zejména pro větší výkon používají motory s cizím buzením, v nichž se magnetické pole vytváří proudem budicího vinutí, navinutého na tzv. hlavních (budicích) pólech statoru. Nevýhoda těchto motorů – větší Jouleovy ztráty v budicím vinutí – je na druhou stranu vykompenzována možností regulace odbuzováním.

Tento druh motoru způsobuje indukční záření v okamžiku odpojení/zastavení a kvůli tření kartáčů také způsobuje elektromagnetické záření. Tento jev bude eliminován pomocí paralelně připojené diody a tří keramických kondenzátorů 0,1 až 1 μF , přičemž dva ze tří kondenzátorů budou připojeny mezi výstupy a kostrou. [11]

3. MAKETA PRÁCE

Maketové zapojení měřicího přístroje viz obr. 3.1.



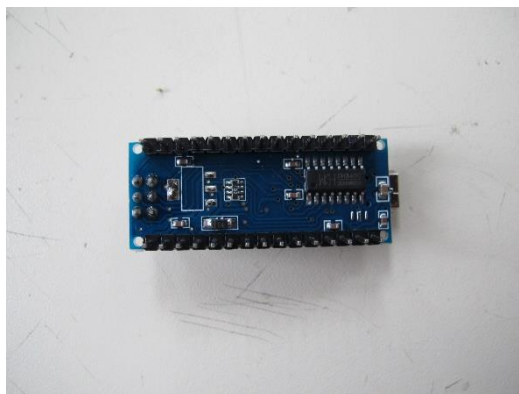
Obr. 3.1: Maketové zapojení měřicího přístroje

Měření ukázalo velkou spotřebu proudu u DC motoru. Motor, který byl využit v práci (DC motor 3-5V 17-18000RPM) nelze považovat za vhodný, protože má spotřebu v rozsahu 230-500 mA. Pomocí pulzně šířkové modulace (PWM) bylo docíleno snížení spotřeby proudu do 170 mA pro požadované otáčky. To znamená, že použijeme-li jiný motor, třeba RF-370C, který má proud na prázdno $I = 70\text{mA}$, bude ušetřena kapacita akumulátoru a prodloužíme dobu provozu. Příklad alternativního motoru viz obr. 3.1.



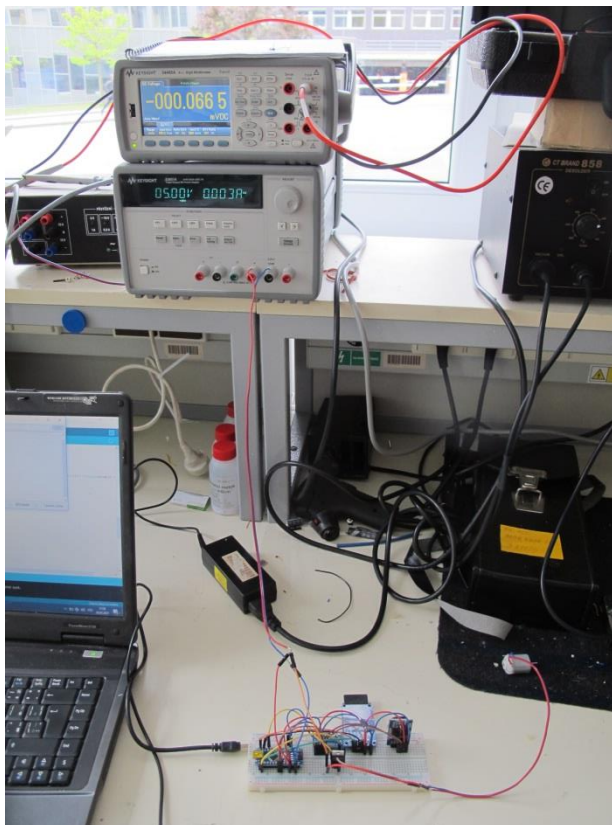
Obr. 3.1: Motor RF-370C

Pokud bude Arduino napájeno přímo z power banky napětím +5V potom bude možné odstranit lineární stabilizátor napětí a uspoříme energii.[12] Viz obr. 3.2.



Obr. 3.2: Arduino Nano bez stabilizátoru napětí

Nejmenšího proudového odběru lze dosáhnout při vypínání SD čtečky v uspaném režimu. $I = 3 \text{ mA}$. Vypnout čtečku možné pomocí tranzistoru v režimu spínače. Nejmenší proudový odběr viz obr. 3.3.



Obr. 3.3: Proudový odběr bez SD karty

Příklad zápisu výsledků měření viz obr. 3.4.

30.5.2021 11:23:41 ;intenzita;3309.33;V/m;
30.5.2021 11:23:51 ;intenzita;3307.33;V/m;
30.5.2021 11:24:1 ;intenzita;3309.33;V/m;
30.5.2021 11:24:12 ;intenzita;3307.33;V/m;
30.5.2021 11:24:22 ;intenzita;3307.33;V/m;
30.5.2021 11:27:37 ;intenzita;3309.33;V/m;
30.5.2021 11:27:47 ;intenzita;3307.33;V/m;
30.5.2021 11:27:57 ;intenzita;3307.33;V/m;

Obr. 3.4: Příklad zápisu na SD kartě

ZÁVĚR

V rámci bakalářské práce byla probrána teorie atmosférické elektřiny a vypracován teoretický návrh měřiče elektrostatického pole.

Pro kontinuální měření byla navrženo použití power banky s napětím 5 V a kapacitou 20000 mAh, která bude teoreticky schopna napájet celý měřič po dobu 60 hodin, v úsporném režimu do 600 hodin. Pro roztočení ventilátoru byl zvolen stejnosměrný motor s rychlostí dostatečnou na to, aby vznikl proud iontů, který vytváří úbytek napětí na zátěži, ale měření ukázalo, že je nutná výměna motoru s menší proudovou spotřebou, protože jinak bude docházet k rychlému vybíjení akumulátoru.

K tomuto motoru byl navržen driver na základě MOSFET tranzistoru, který lze použít u kterýkoliv typu DC motoru.

Pro zesílení signálu, který se objeví na zátěži, byl zvolen citlivý operační zesilovač OPA131.

K odstranění vlastního šumu sondy byla použita metoda synchronní detekce na základě synchronního zesilovače AD630.

Aby byl zesílený analogový signál převeden do digitální podoby, bude potřeba analogově-číslicový převodník ADS1115. Pro zpracování naměřených hodnot a řízení byla zvolena řídicí jednotka Arduino Nano. Použitý mikrokontrolér má malou spotřebu, kterou lze snížit s odpojením stabilizátoru napětí a svítící diody. Kromě hardwerových řešení úspory lze taky použít programové úsporné mody jako snížení kmitočtu hodin z 16 MHz do 1 MHz, vypínání vlastního A/D převodníku a knihovny LowPower.h.

Čtečka SD karty má spotřebu $I = 20$ mA během uspaní arduina, tuto nežádoucí spotřebu lze eliminovat připojením MOSFET tranzistoru v režimu spínače. Tento tranzistor bude vypínat SD čtečku během uspaní arduina.

Za splnění všech úsporných podmínek lze dosáhnout nejmenší spotřeby proudu $I = 3$ mA v uspaném stavu a 239 mA v pracovním režimu.

Všechna data budou uložena na mikro SD kartě a pak zpracována na počítač.

LITERATURA

- [1] YONG Cui, HAIWEN Yuan, XIAO Song , LUXING Zhao, YUMENG Liu, and LIWEI LIN. Model, design, and testing of field mill sensors for measuring electric fields under high-voltage direct-current power lines, *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, 2018 VOL. 65, NO. 1, s 608-615
- [2] MARINOV T., POPOVA P, MITEV M. Atmospheric electrostatic field acquisition system with charge sensing, *Texas Instruments European Analog Design Contest 2013 Project Report*. Technical University – Sofia Bulgaria, 2013, 10s
- [3] VRBA K., HERENCŠÁR N., KOTON J. Analogová technika. Příloha č. 1: Plně inovovaná a kompletizovaná přednášková skripta předmětu, Brno VUT 2011, 201 s
- [4] IMYANITOV I., CHUBARINA E. Electricity of the free atmosphere. Results of Measurements Carried Out During the International Geophysical Year and Year of International Geophysical Collaboration, *Gidronieteorologicheskoe Izdatel'stvo Leningrad* 1965, Israel Program for Scientific Translations Jerusalem 1967 , 218s
- [5] INA116 Datasheet Ultra Low Input Bias Current INSTRUMENTATION AMPLIFIER, Texas Instruments, 2009, 11s dostupno na <WWW.ALLDATASHEET.COM>
- [6] IVC102 Datasheet PRECISION SWITCHED INTEGRATOR TRANSIMPEDANCE AMPLIFIER , Texas Instruments, 2020, 15s
- [7] BARTUŠEK K., GESCHEIDTOVÁ E., REZ J., STEINBAUER M., KUBÁSEK R., MIKULKA J., Měření v elektrotechnice, Brno VUT, 2010, 210s
- [8] OPA131 datasheet General-Purpose FET-INPUT OPERATIONAL AMPLIFIERS, Texas Instruments, 2020
- [9] SMIRNOV E., Změny v elektrickém poli Země v seismických regionech, jako ukazatele silných zemětřesení a erupčních jevů na Slunci. Disertační práce . *Federální státní rozpočtový ústav vědního ústavu pro kosmofyzický výzkum a distribuci radiovln. dálně východní odvětví Ruské akademie věd Petropavlovsk-Kamčatskij* , 2018, 259s
- [10] FEYNMAN R. Lectures on physics. *Basic Books*, 2010, 566s ISBN: 978-0-465-07998-8,
- [11] VRBA K. Konstrukce elektronických zařízení. Brno, FEKT, VUT, 2013, 152s., ISBN 978-80-214-4719-6
- [12] Arduino běžící na baterky. [Http://www.1cip.radekc.eu/](http://www.1cip.radekc.eu/) [online]. Brno, 2016-03-02 22:16:39 [cit. 2021-5-31]. Dostupné z: <http://www.1cip.radekc.eu/clanek/arduino-bezici-na-baterky>