ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní
Ústav přístrojové a řídící techniky

Zařízení pro automatické měření voltampérových charakteristik

Device for automated measurement of Volt-Ampere characteristics

Bakalářská práce

Studijní program: Strojírenství

Studijní obor: Informační a automatizační technika

Autor bakalářské práce: Gurov Alexandr

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Martin Novák Ph.D.

Praha 2018

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Gurov** Jméno: **Alexandr** Osobní číslo: **438308**

Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**

Zadávající katedra/ústav: **Ústav přístrojové a řídicí techniky**

Studijní program: **Strojírenství**

Studijní obor: **Informační a automatizační technika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Zařízení pro automatické měření volt-ampérových charakteristik

Název bakalářské práce anglicky:

Device for automated measurement of Volt-Ampere characteristics

Pokyny pro vypracování:

1) navrhněte zařízení pro automatické měření volt-ampérových charakteristik.
2) zařízení realizujte. Měření má být prováděno periodicky a krátkodobě. Doba měření cca 0,1 s - 1 s.
3) zařízení experimentálně ověřte. Výstupem budou zaznamenaná data voltamprových charakteristik na SD kartě.
Doporučené rozsahy: napětí 0 až cca 150 V, proud 0 až cca 3 A (stejnosměrné veličiny)

Seznam doporučené literatury:

Li J., Liu Y., Bo X. (2012) The Research of Maximum Power Point Tracking Method for Photovoltaic System. In: Zhang Y. (eds) Future Wireless Networks and Information Systems. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 144. Springer, Berlin, Heidelberg
Ratna Ika Putri, Sapto Wibowo, Muhamad Rifa?i, Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic Using Incremental Conductance Method, Energy Procedia, Volume 68,
2015, Pages 22-30, ISSN 1876-6102,

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Ing. Martin Novák, Ph.D., odbor elektrotechniky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **18.04.2018** Termín odevzdání bakalářské práce: **15.06.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

doc. Ing. Martin Novák, Ph.D. podpis vedoucí(ho) práce	podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry	prof. Ing. Michael Valášek, DrSc. podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

25. 04. 2018
Datum převzetí zadání

Podpis studenta

© ČVUT v Praze, Design: ČVUT v Praze, VIC

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze . . 2018 .....

Alexandr Gurov

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu doc. Ing. Martinu Novákovi za podporu a cenné rady, které mě dovedli k úspěšnému dokončení bakalářské práce.

Bachelor’s Thesis title:

Device for automated measurement of Volt-Ampere characteristics

Abstract:

This thesis deals with automating the process of measuring current-voltage characteristics of the photovoltaic cell. Work continues on the electrical scheme proposed by me, which allows accurate automated measurements of current and voltage characteristics of the PV panel. Analog signals from the power electronics are converted to digital form and subsequently processed by the microprocessor and stored into SD card for further processing in a graph the subject of this bachelor's thesis is only the acquisition and digital processing of measured values.

Key words:

Current–voltage characteristic, Solar cell, Digital data processing, Electronic platform Arduino NANO, Wiring, IDE, SD card, Module of SD Card, Current, Voltage, Power, Sensors.

Název bakalářské práce:

Zařízení pro automatické měření voltampérových charakteristik

Abstrakt:

Tato bakalářská práce se zabývá automatizací procesu měření voltampérových charakteristik fotovoltaického článku pomocí automatického zařízení. Analogové signály ze silové části jsou převedeny do digitální podoby a následně zpracovány pomocí mikroprocesoru a ukládány do SD karty k dalšímu zpracování v grafu. Předmětem této bakalářské práce je pouze získání a digitální zpracování měřených veličin.

Klíčová slova:

Voltampérová charakteristika, Fotovoltaický článek, Digitální zpracování dat, Elektronická platforma Arduino NANO, Wiring, IDE, SD karta, Modul SD karty, Proud, Napětí, Výkon, Senzory.

Obsah

Seznam zkratek 8
Úvod 9
1. Teoretická část 10
1.1. Solární panel 10
1.2. Voltampérová charakteristika 10
1.3. Bod maximálního výkonu (MPP) 11
1.4. Zátěž 11
1.4.1. Cívka 11
1.4.2. Tranzistor 12
1.4.3. Dioda 13
1.4.4. Schéma principiálního obvodu zátěže 13
1.5. Senzor proudu s Hallovou sondou 14
1.6. Senzor napětí s Hallovou sondou 15
1.7. PWM generátor 16
1.7.1. Analogová pulzně šířková modulace 16
1.7.2. Digitální pulzně šířková modulace 17
1.7.3. PWM signál v Arduino 17
2. Návrhová část 18
2.1. Senzory měření a ostatní prvky pro realizaci schématu 18
2.2. Popis schématu celého zařízení 19
2.3. Schéma zapojení 20
3. Realizační část 21
3.1. Výroba plošných spojů 21
3.1.1. EasyEda 21
3.1.2. Schéma 21
3.1.3. Návrh samotné desky 23
3.1.4. Zhotovení základní desky 23
3.1.5. Pájení a kontrola spojů 24
4. Arduino 24
4.1. Arduino NANO 24
4.2. Software 25
4.2.1. IDE 25
4.2.2. Programovací jazyk 25
4.2.3. Program pro zařízení 26
4.2.4. Zdrojový kód 27
5. Komunikace 29
5.1. SD karta 29
5.2. Modul SD karty pro Arduino 29

6. Testování 30
Závěr 36
Seznam obrázků 37
Seznam tabulek 38
Seznam grafů 38
Seznam použitých zdrojů 39

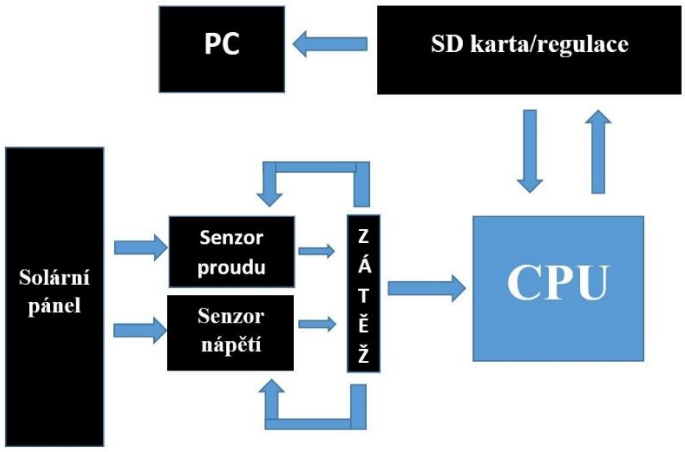
Seznam zkratek

I	Current (Proud)
U	Voltage (Napětí)
P, PWR	Power (Výkon)
GND	Ground (země)
CD	Compact Disk (kompaktní disk)
SP	Solar panel (Solární panel)
PWM	Pulse Width Modulation (Pulsně šířková modulace)
MPP	Maximal Power Point (Bod maximálního výkonu)
AN	Arduino NANO
USB	Universal Serial Bus (univerzální sériová sběrnice)
SD	Secure Digital card (SD karta)
MSD	Module of SD Card (Modul SD karty)
VA, VAC	Voltampérová charakteristika
ISZ	Intenzita Slunečního Záření

Úvod

Solární energie je jedním z hlavních směrů moderní alternativní energie. Princip je založen na transformaci energie Slunce na jiný druh energie. Solární panely se používají k přeměně slunečního záření na elektrický proud. Jednou z nejdůležitějších vlastností solárního panelu je jeho voltampérová charakteristika (VAC).

Pro provádění výzkumu v oblasti solární energie bylo nutné vyvinout automatizované zařízení pro zaznamenání VAC solárního panelu. Výsledky měření by měly být zapsány do souboru na SD kartu a dále se z těchto výsledků vytvoří graf závislosti proudu na napětí. S ohledem na tuto charakteristiku je možné určit maximální výkon solárního článku a zvolit nejúčinnější provozní režim. Celé měření bude automatické, kdy uživatel připojí zařízení k solárnímu panelu a zapne ho. Jak lze vidět na *obr 1.1*, celé zařízení bude rozděleno na šest částí.



Obrázek č. 1. Blokové schéma automatického zařízení

První blok je solární fotovoltaický článek, který pohltí sluneční energii a převádí jí na elektrický proud. Další dva bloky se jmenují senzor proudu a senzor napětí, jejichž úkolem je změření proudu a napětí solárního článku. Tyto senzory odesílají hodnoty do CPU, což je mikroprocesor Atmega2560. K bloku CPU je připojena SD karta pomocí modulu SD karty, která ukládá hodnoty do souboru. Dále se SD karta vkládá do PC, kde se následně z těchto hodnot spočítá výkon a sestrojí graf voltampérové charakteristiky a graf výkonu. Vše bude zajišťováno ve vlastním vývojovém prostředí Arduino, které se nazývá IDE a k ní implementovanou knihovnu Wiring.

Cílem bakalářské práce je navrhnout tyto bloky, zajistit jejich vzájemnou komunikaci a realizovat toto zařízení tak, aby měření probíhalo automaticky. Dalším cílem je sestavení vhodného a krátkého návodu, popisování postupu vyrábění samotné základní desky, testování, měření VA charakteristik a jejich analýza.

Bakalářská práce je členěna do šesti kapitol, z nichž první část popisuje vlastnosti používaných součástí schématu a slouží jako teoretický základ pro následné stanovení pracovních parametrů automatického zařízení. Druhá kapitola je návrhová. Tato část obsahuje podrobně popsaný kompletní návrh pro obvodové řešení daného úkolu, popsané schéma zapojení a k němu zdrojový kód. K třetí, realizační části, patří vypracování základní desky, realizace zdrojového kódu a kontrola všech spojů. Ve čtvrté části práce je popsaná historie, funkčnost a technické specifikace mikrokontroléru Arduina, popsáno programovací prostředí a celý program na fungování zařízení. Pátá část (Komunikace) vysvětluje, jak probíhá přenos dat «zařízení-počítač» a co se k tomu používá, obsahuje popis SD karty a modulu k ní. Poslední část je testovací, tato část popisuje postup provádění měření a použitá zařízení, sestrojení grafů a také je zde provedena analýza voltampérové charakteristiky. Práce ukončena závěrem.

1. Teoretická část

1.1. Solární panel

Obrázek.č.1.1. Solární panel Waaree WS-5/12V [10]

Fotovoltaický článek funguje díky fotoelektrickému jevu, který je založený na principu uvolňování elektronů elektromagnetickým záření. Samotný článek je křemíková destička s PN přechodem. Jeho základem je tenká křemíková destička s vodivostí typu P. Na ní se při výrobě vytvoří tenká vrstva polovodiče typu N, obě vrstvy jsou odděleny tzv. přechodem P-N. Osvětlením článku vznikne v polovodiči vnitřní fotoelektrický jev a v polovodiči se z krystalové mřížky začnou uvolňovat záporné elektrony. Na přechodu P-N se vytvoří elektrické napětí. Hlavní charakteristikou je poměrně malé generované napětí oproti proudu, z tohoto důvodu se tyto články sérioparalelně skládají do tzv. fotovoltaických panelů. K deskám se napájí tenké proužky mědi, což je uskutečněno za účelem měření (odebíraného) proudu. Jedna křemíková deska je dostatečně výkonná a v důsledku větší plochy panelu se produkuje více energie. [21]

Spojené desky, kterými procházejí sluneční paprsky, se pokrývají tenkým filmem a upevňují ke sklu. Vázané vrstvy jsou uzavřeny v hliníkovém rámu. Tuto konstrukci lze vidět na *obrázku č. 1.1*.

Účinnost panelů závisí na několika faktorech a nepřekračuje 40-50% teoreticky a 10-20% prakticky. Rozměr plochy solární baterie přímo ovlivňuje její výkon. Účinnost také závisí na materiálu modulů. Desky jsou vyrobeny z monokrystalického, polykrystalického a amorfního křemíku a fólie [20]. Nejpopulárnějšími panely jsou dnes panely z tenké vrstvy, a to především díky ceně.

U panelů se udává jejich výstupní napětí a výkon, který jsou schopny v ideálním případě dodat. Ten nastává, pokud sluneční paprsky dopadají kolmo na panel, obloha je bez mraků atd. [20]

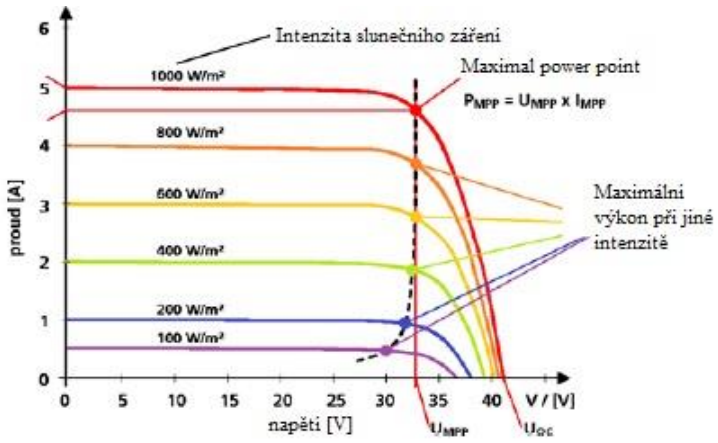
Poměrně nízká účinnost a citlivost na kvalitu slunečního světla má tedy za následek to, že stačí panel zastínit třeba rukou, zanést ho prachem, nebo napadaným listím a výkon jde poměrně rychle dolů.[20]

V moje práci byl zvolen solární panel značky *Waaree WS-5/12 V*, a sice kvůli rozměrům a ceně. Vybraný solární panel je s výstupním napětím 12 V a proudem 0,3 A. Technické specifikace jsou uvedeny v příloze *[Datasheet solárního panelu Waaree WS-5/12V] [10]*.

1.2. Voltampérová charakteristika

Voltampérová charakteristika je nejdůležitějším parametrem fotovoltaického článku.

Změnu VA charakteristiky v závislosti na intenzitě slunečního záření lze vidět *na obrázku č. 1.2.* Základní vlastností je změna generovaného proudu na krátko při změně intenzity záření oproti relativně konstantnímu napětí na prázdno. Panel bude mít stejnou voltampérovou charakteristiku, když nebude mít žádné výrobní vady ani poškození časem. Taktéž voltampérová charakteristika bude značně deformovaná, když budou zastíněné jednotlivé články tohoto solárního panelu, což hraje velkou roli. Snížení důsledků zastínění lze se vyhnout přidáním paralelních diod k jednotlivým větvím, a použitím pulzní šířkové modulace (PWM – Pulse Width Modulation), která bude popsaná v kapitole 1.7 (PWM generátor).



Obrázek č. 1.2. Změna VA charakteristiky v závislosti na intenzitě slunečního záření [21]

1.3. Bod maximálního výkonu (MPP)

Bod maximálního výkonu *(MPP – maximal power point)* ukazuje, při jakém napětí a proudu solární panel/článek bude dodávat maximální výkon. MPP se mění v závislosti na intenzitě dopadajícího slunečního záření a na teplotě panelu. [21]

Na grafu *(obrázek č. 1.2)*, je tento bod označen jako MPP (maximal power point). MPP je nejdůležitějším parametrem solárního panelu, aby panel fungoval s vysokou účinností. A z toho důvodu důležitost je v tom, aby zátěž odebírala proud co nejblíže k bodu maximálního výkonu. Čím blíž k MPP, tím výkonnější panel/článek. V kapitole č. 6. (Testování) lze vidět MPP pro různé zdroje světla.

1.4. Zátěž

Každý spotřebič elektrické energie je považován za zátěž v elektrickém obvodu. Zatížení působí na elektrický proud, a velikost proudu závisí na impedanci zátěže. Proud protéká přes vodiče od zdroje proudu k zatížení a zpět. Jako vodiče se používají materiály s nejmenším odporem, například to jsou měď, hliník, stříbro a zlato.

V teto práci za zátěž byla vybraná měděná indukční cívka, která byla zapojená do obvodu s diodou, unipolárním tranzistorem a zdrojem. Indukční cívka popsaná v kapitole č. 1.4.1. (Cívka), a k ní schéma zapojení všech prvků, které spolu skládají principiální obvod zátěže *(kapitola č. 1.4.4. Schéma principiálního obvodu zátěže)*.

1.4.1. Cívka

Obrázek.č.1.4.1. Toroidní cívka o indukčnosti 25mH [17]

Cívka je elektronická součástka používaná v elektrických obvodech.
Podle rozměrů a tvaru lze rozlišit obyčejnou cívku, solenoid (velmi dlouhá cívka) a toroid (cívka stočená do kruhu). V našem případě byla použitá toroidní cívka o indukčnosti 25mH *(obrázek č. 1.4.1.)* Cívky strukturně mohou být zastoupeny v jednovrstvém a vícevrstvém vinutí vodiče. V tomto případě navíjení drátů může být prováděno na dielektrických rámech různých tvarů: kruhovém, čtvercovém, obdélníkovém; a bezrámová cívka. Technologie výroby cívky toroidního typu je široce používána. Nejčastěji jsou závity vodiče navzájem těsně navinuté. [17, 24]

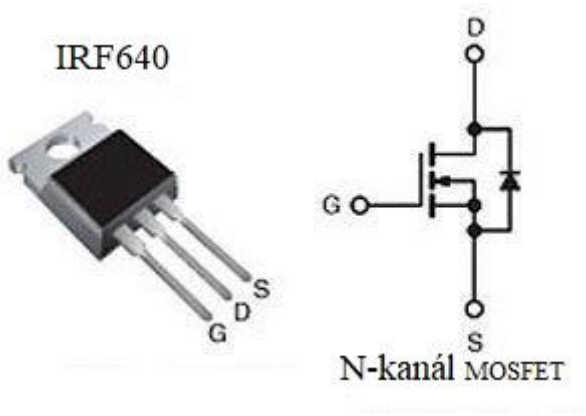
V obvodu stálého stejnosměrného proudu se cívka projevuje pouze svým elektrickým odporem. Kolem cívky se průchodem stejnosměrného proudu vytváří stálé magnetické pole. Magnetický indukční tok závisí přímo úměrně na indukčnosti cívky a velikosti proudu.

Elektrický proud přispívá k akumulaci energie v magnetickém poli cívky. Pokud je vypnuto napájení, energie cívky se vrátí do elektrického obvodu. Aby nedocházelo k tomuto ději, je použita dioda s P-N přechodem, která je zapojena paralelně k cívce. Popis a parametry diody jsou podrobněji vysvětleny v kapitole č. 1.4.3 (Dioda).

1.4.2. Tranzistor

Tranzistor je elektronické polovodičové zařízení, ve kterém je proud v obvodu dvou elektrod řízen třetí elektrodou. Tranzistor je nejpoužívanější polovodičová součástka. Základními typy tranzistoru jsou bipolární a unipolární. [5]

V tomto zařízení je použit unipolární tranzistor typu MOSFET (metal-oxid-semiconductor field effect transistor), a sice kvůli velmi vysoké vstupní impedanci a velmi malému vstupnímu proudu. Unipolární tranzistory mají vyšší rychlost přechodu mezi stavy proudové vodivosti a nevodivosti, proto mohou pracovat s vyššími frekvencemi. Také zesílení unipolárních tranzistorů je aktuálně mnohem vyšší oproti bipolárním. [5]



Obrázek č.1.4.2. Struktura unipolárního tranzistoru IRF640 [11]

MOSFET je druh tranzistorů řízených elektrickým polem, u nichž je vodivost kanálu mezi elektrodami S (Source) a D (Drain) řízena napětím elektrody G (Gate), která je tvořena kovem odizolovaným od zbytku struktury tenkou vrstvou oxidu křemičitého. Zapojení (vývody tranzistoru) a součástku unipolárního tranzistoru lze vidět *na obrázku č. 1.4.2*. [11]

U každého tranzistoru jsou výrobcem uvedeny parametry tranzistoru, stejně tak jako neelektrické parametry (těmi nejdůležitějšími neelektrickými parametry jsou údaje o teplotách a ztrátových výkonech tranzistoru). Příklad základních parametrů tranzistoru a jejich typických hodnot je uveden v *tabulce č. 1.* Jedná se o tranzistor IRF640 *(obr.1.2.)* který byl použít v zařízení, a jeho mezní hodnoty. Tyto parametry nám ukazují, jaké hodnoty proudů nesmíme překročit při provozu daného tranzistoru, aby nedocházelo k jeho zničení. Tato tabulka také ukazuje, při jakých teplotách je tranzistor schopen pracovat a jaký výkon se přemění v teplo při jeho provozu. Podrobná charakteristika použitého tranzistoru je uvedená v přiloze *[Datasheet Power MOSFET Vishay IRF640] [11]*.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (T_C = 25 °C, unless otherwise noted)					
PARAMETER			**SYMBOL**	**LIMIT**	**UNIT**
Drain-Source Voltage			V_{DS}	200	V
Gate-Source Voltage			V_{GS}	± 20	
Continuous Drain Current	V_{GS} at 10 V	T_C = 25 °C	I_D	18	A
		T_C = 100 °C		11	
Pulsed Drain Current [a]			I_{DM}	72	
Linear Derating Factor				1.0	W/°C
Single Pulse Avalanche Energy [b]			E_{AS}	580	mJ
Repetitive Avalanche Current [a]			I_{AR}	18	A
Repetitive Avalanche Energy [a]			E_{AR}	13	mJ
Maximum Power Dissipation	T_C = 25 °C		P_D	125	W
Peak Diode Recovery dV/dt [c]			dV/dt	5.0	V/ns
Operating Junction and Storage Temperature Range			T_J, T_{stg}	-55 to +150	°C
Soldering Recommendations (Peak temperature) [d]	for 10 s			300	
Mounting Torque	6-32 or M3 screw			10	lbf · in
				1.1	N · m

Tabulka č. 1. Základní parametry tranzistoru IRF640 Vishay [11]

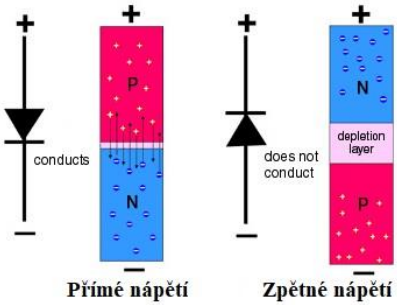
U tranzistoru MOSFET nepoteče proud I_{DS} mezi elektrodami D a S, bude-li na elektrodě G nulové napětí vůči elektrodě S. Je to tím, že inverzní vrstva je indukována napětím na hradle tranzistoru, bez napětí inverzní vrstva neexistuje a tranzistor tedy proud nevede. Tento transistor proto nazýváme tranzistorem

MOSFET s indukovaným kanálem. Pracovní oblast napětí na hradle leží v oblasti záporných napětí vůči elektrodě S. To je často výhoda, neboť nám v zařízení stačí jeden zdroj napětí (což je v tomto případě právě solární panel).

1.4.3. Dioda

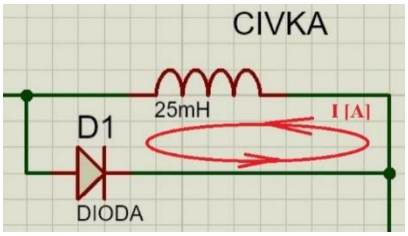
Dioda je elektronický prvek s různou vodivostí v závislosti na směru elektrického proudu. Je to malá deska z křemíku, jedna část má elektrickou vodivost typu P (positive). Tato část má uměle vytvořený deficit elektronů. Druhá část má elektrickou vodivost typu N (negative), která obsahuje přebytek elektronů. Hranice mezi nimi se nazývá P-N přechodem. Oblast p-typu zdrojového polovodiče je anoda (kladná elektroda), oblast typu n je katodou diody, což je záporná elektroda *(obrázek č. 1.4.3.1.)*. [2, 26]

Je-li k diodě připojeno kladné napětí (anoda má pozitivní potenciál vzhledem ke katodě), dioda bude otevřená (proud teče diodou, dioda má malý odpor). Je-li k diodě připojeno záporné napětí (katoda má pozitivní potenciál vzhledem k anodě), dioda je uzavřená, a odpor diody v tomto případě je velký a zpětný proud je malý (může být považován za nulový). Proud v obvodu «cívka-dioda» *(obrázek č. 1.4.3.2.)*.



Obrázek č. 1.4.3.1. struktura diody s p-n přechodem [26]

V tomto zařízení je použita dioda Schotky MBR160, technické specifikace jsou uvedeny v příloze *[Datasheet Diody MBR160]* [19].

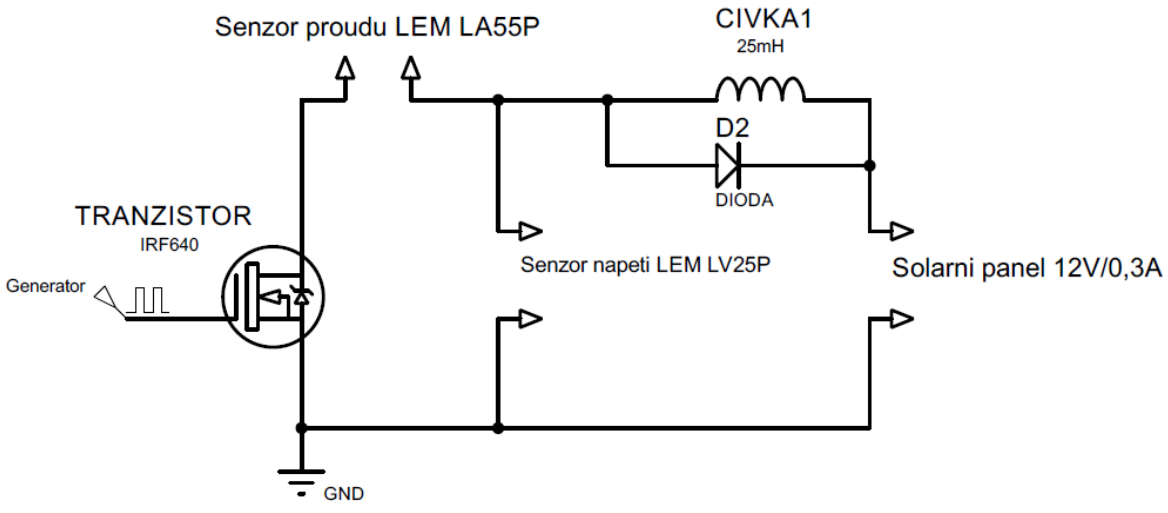


Obrázek č. 1.4.3.2. Zapojení diody k cívce a procházení proudu cívkou

1.4.4. Schéma principiálního obvodu zátěže

Prvky, které byly uvedeny v kapitolách č. 1.4.1, 1.4.2. a 1.4.3. jsou zapojeny do obvodu, který lze vidět na *obr. 1.4.4.* Tento obvod ukazuje, jak by se mělo postupovat v realizaci zapojení zátěže do celého schématu zařízení.

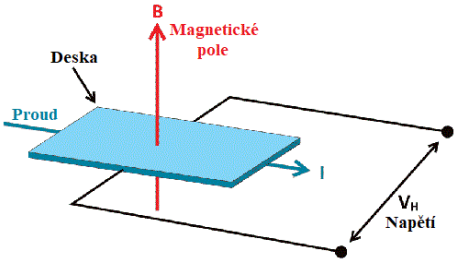
Senzory proudu a napětí jsou popsané v kapitolách č. 1. 5. a 1.6. Šipky ukazují kam jsou připojeny senzory a solární panel.



Obrázek č. 1.4.4. Schéma principiálního obvodu zátěže (vytvořeno v prostředí Proteus 8 Professional)

1.5. Senzor proudu s Hallovou sondou

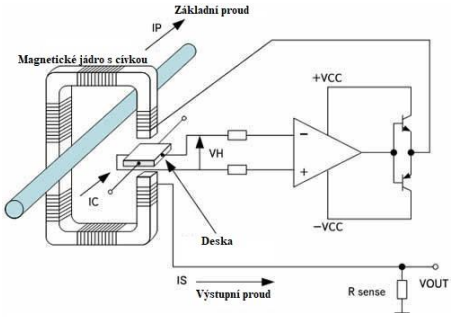
Hallova sonda je snímač magnetického pole. Byla pojmenována podle principu jeho práce – Hallově jevu (*obr. 1.5*): jestliže je v magnetickém poli umístěna deska s protékajícím proudem, pak se elektrony v desce odkloní ve směru kolmém ke směru proudu, směr odchylování elektronů závisí na polaritě magnetického pole. [3, 16]



Obrázek č.1.5. Hallův jev [16]

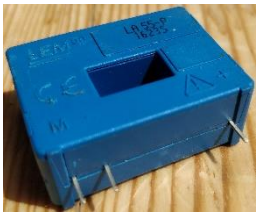
Když vytvoříme snímač, vezmeme magnetický obvod, protáhneme drát měřeného obvodu skrz obvod a umístíme Hallův senzor do části magnetického obvodu, čím získáme snímač proudu otevřeného typu. Výhodou tohoto snímače je jednoduchost, ale nevýhodou je přitomnost magnetizace jádra, tedy zvýšení nelinearity naměřených hodnot. [3, 16]

Připojením vinutí do jádra, po které začne protékat proud, dosáhneme zvýšení linearity snímače a třídy přesnosti (*obr. 1.5.1*).



Obrázek č. 1.5.1 Senzor poudu s Hallovou sondou [16]

V tomto zařízení je použit senzor proudu značky LEM, typu LA55-P, který uveden na *obrázku č. 1.5.2*. Výhody tohoto senzoru: vynikající přesnost, dobrá linearita, vysoká odolnost proti rušení a má nadproudovou ochranu. Nevýhodou je ovšem cena.



Obrázek č. 1.5.2. Senzor proudu LEM LA-55P

U každého senzoru proudu jsou výrobcem uvedeny parametry snímače, také jsou zde uvedeny elektrické parametry. Těmi nejdůležitějšími elektrickými parametry jsou nominální proudy, měřené proudy, odchylky v měření a pracovní napětí. Základní parametry senzoru proudu a jeho typické hodnoty jsou uvedeny v *tabulce č. 2.* Jedná se o snímač, který používán v tomto zařízení (LEM LA-55P) a jeho mezní hodnoty, které byly použité v daném zařízení. Tyto parametry ukazují, jaké hodnoty proudů nesmíme překročit při provozu daného senzoru, aby nedocházelo k přesycení. Tato tabulka také ukazuje, při jakých teplotách je senzor schopen pracovat. Rozměry a všechny ostatní parametry dané součástky jsou uvedeny v příloze *[Datasheet LEM LA 55-P] [8]*.

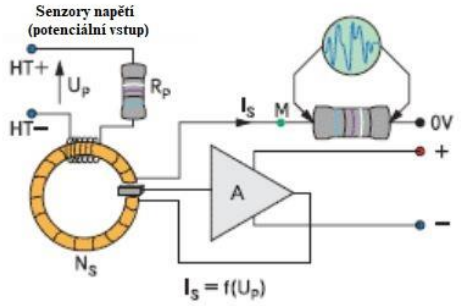
Electrical data								
I_{PN}	Primary nominal rms current				50			A
I_{PM}	Primary current, measuring range				0 .. ±70			A
R_M	Measuring resistance @			T_A = 70 °C		T_A = 85 °C		
				$R_{M\,min}$	$R_{M\,max}$	$R_{M\,min}$	$R_{M\,max}$	
	with ±12 V	@ ±50 A_{max}		10	100	60	95	Ω
		@ ±70 A_{max}		10	50	60 [1]	60 [1]	Ω
	with ±15 V	@ ±50 A_{max}		50	160	135	155	Ω
		@ ±70 A_{max}		50	90	135 [2]	135 [2]	Ω
I_{SN}	Secondary nominal rms current				50			mA
K_N	Conversion ratio				1 : 1000			
U_C	Supply voltage (±5 %)				±12 .. 15			V
I_C	Current consumption				10 (@ ±15 V) + I_S			mA
Accuracy - Dynamic performance data								
X	Accuracy @ I_{PN}, T_A = 25 °C		@ ±15 V (±5 %)		±0.65			%
			@ ±12 .. 15 V (±5 %)		±0.90			%
ε_L	Linearity error				<0.15			%
					Typ	Max		
I_O	Offset current @ I_P = 0, T_A = 25 °C					±0.2		mA
I_{OM}	Magnetic offset current [3] @ I_P = 0 and specified R_M, after an overload of 3 × I_{PN}					±0.3		mA
I_{OT}	Temperature variation of I_O	-25 °C .. +85 °C			±0.1	±0.6		mA
		-40 °C .. -25 °C			±0.2	±1.0		mA
t_{ra}	Reaction time				<500			ns
t_r	Step response time to 90 % of I_{PN}				<1			µs
di/dt	di/dt accurately followed				>200			A/µs
BW	Frequency bandwidth (-1 dB)				DC .. 200			kHz
General data								
T_A	Ambient operating temperature				-40 .. +85			°C
T_S	Ambient storage temperature				-40 .. +90			°C
R_S	Resistance of secondary winding	@ T_A = 70 °C			80			Ω
		@ T_A = 85 °C			85			Ω
m	Mass				18			g
	Standards				EN 50178: 1997 UL 508: 2010			

Tabulka č.2. Tabulka pracovních hodnot senzoru proudu LEM LA-55P [8]

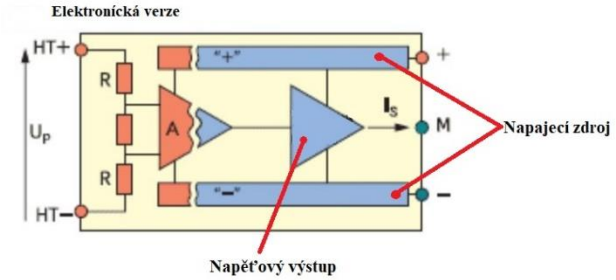
1.6. Senzor napětí s Hallovou sondou

Snímače napětí, pracující na principu Hallova jevu, jsou podobné snímačům proudu. Rozdíl spočívá v cívce primárního vinutí, které obsahuje více závitů. Pro měření napětí je postačující poskytnutí primárního proudu, který je ekvivalentní změněnému napětí. Toto je realizováno pomocí odporu zapojeného v sérii s primárním vinutím *(obrázek č. 1.6.1.).* [27]

Nová generace snímačů napětí je vyrobená plně elektronickou technologií, která nepotřebuje použití magnetického obvodu. Uvnitř senzoru je deska s plošnými spoji s elektronickými součástkami. Naměřené napětí se aplikuje na vstupní svorky senzoru, zmenší se děličem napětí a poté se převede na sekundární proud pomocí speciálního galvanicky odděleného zesilovače a elektronických součástek *(obrázek č. 1.6.2.).* [27]



Obrázek č. 1.6.1. Senzor napětí s Hallovou sondou [27]



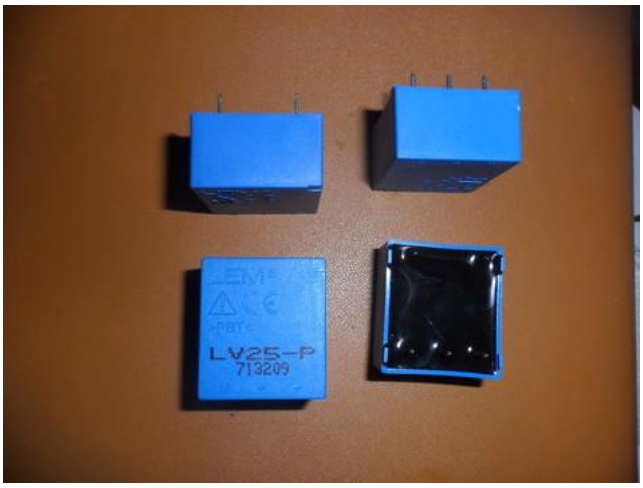
Obrázek č. 1.6.2. Senzor napětí v elektronické verzi [27]

Pro můj projekt byl vybrán senzor napětí značky LEM, typu LV25-P *(obrázek č. 1.6.3.)*. Zařízení zajišťuje galvanické oddělení mezi primárním a sekundárním obvodem. Pro měření napětí je nutné měřit intenzitu proudu, která je úměrná naměřenému napětí na externím odporu.

Výhody LV25-P:

- vhodný pro elektronické měření napětí na stejnosměrných obvodech;
- poskytuje galvanické oddělení mezi primárním a sekundárním obvodem;
- vynikající přesnost a linearita;
- malý teplotní drift;
- rychlá odezva;
- vysoká šířka pásma;
- vysoká odolnost proti vnějšímu rušení; [4]

Základní parametry senzoru napětí a jeho typické hodnoty jsou uvedeny *v tabulce č. 3,* a podrobnosti jsou uvedeny v příloze *[Datasheet LEM LV 25-P] [9]*.



Obrázek č. 1.6.3. Senzor napětí LEM LV25-P

Electrical data					
I_{PN}	Primary nominal rms current		10		mA
I_{PM}	Primary current, measuring range		0 .. ± 14		mA
R_M	Measuring resistance		$R_{M\,min}$	$R_{M\,max}$	
	with ± 12 V	@ ± 10 mA $_{max}$	30	190	Ω
		@ ± 14 mA $_{max}$	30	100	Ω
	with ± 15 V	@ ± 10 mA $_{max}$	100	350	Ω
		@ ± 14 mA $_{max}$	100	190	Ω
I_{SN}	Secondary nominal rms current		25		mA
K_N	Conversion ratio		2500 : 1000		
U_C	Supply voltage (± 5 %)		± 12 .. 15		V
I_C	Current consumption		10 (@ ± 15 V) + I_S		mA
Accuracy - Dynamic performance data					
X_G	Overall accuracy @ I_{PN}, T_A = 25 °C	@ ± 12 .. 15 V	± 0.9		%
		@ ± 15 V (± 5 %)	± 0.8		%
ε_L	Linearity error		< 0.2		%
			Typ	Max	
I_O	Offset current @ I_P = 0, T_A = 25 °C			± 0.15	mA
I_{OT}	Temperature variation of I_O	0 °C .. + 25 °C	± 0.06	± 0.25	mA
		+ 25 °C .. + 70 °C	± 0.10	± 0.35	mA
t_r	Step response time [1] to 90 % of I_{PN}		40		µs
General data					
T_A	Ambient operating temperature		0 .. + 70		°C
T_S	Ambient storage temperature		- 25 .. + 85		°C
R_P	Resistance of primary winding	@ T_A = 70 °C	250		Ω
R_S	Resistance of secondary winding	@ T_A = 70 °C	110		Ω
m	Mass		22		g
	Standards		EN 50178: 1997 UL 508: 2010		

Tabulka č. 3. Tabulka pracovních hodnot senzoru napětí LEM LV25-P [9]

1.7. PWM generátor

Pulzně šířková modulace (PWM – Pulse Width Modulation) je způsob řízení napájení zátěže. Spočívá ve změně šířky impulzu s konstantní frekvencí opakování impulzů, přičemž amplituda impulzů zůstává bez změn.

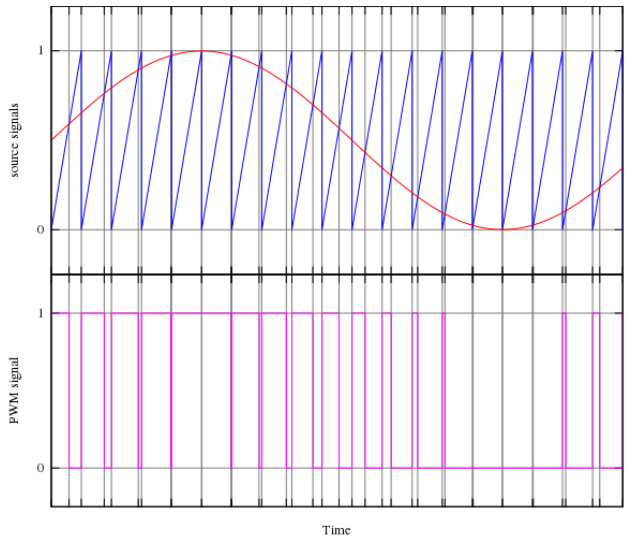
Ovládání šířky impulsu se používá tam, kde je nutné nastavit napájení dodávané na zátěž, například v řídicích obvodech stejnosměrného motoru, pulsních měničů, stmívačích svítidel LED, LCD monitorech, displejích v smartphonech a tabletech, apod.

Většina sekundárních napájecích zdrojů elektronických zařízení je v současné době postavena na základě pulsních měničů, pulzně šířková modulace se používá také u zesilovačů, svařovacích strojů, nabíjecích zařízení pro autobaterie, střidačů, apod. PWM umožňuje zvýšit účinnost sekundárních napájecích zdrojů ve srovnání s nízkou účinností ve spojitém režimu.
PWM se dělí na analogové a digitální. [23]

1.7.1. Analogová pulzně šířková modulace

V generátorech PWM analogového typu je řídicí signál generován analogovým komparátorem, když je na invertující vstup komparátoru aplikován trojúhelníkový nebo pilovitý signál a neinvertující signál je modulován spojitým signálem.

Výstupní pulzy jsou obdélníkové, jejich frekvence se rovná frekvenci signálu trojúhelníkového tvaru a doba trvání kladné části impulzů je vztažena k době, během níž je úroveň modulačního DC signálu aplikovaného na neinvertující vstup komparátoru vyšší než úroveň signálu pily invertující vstup. Když je napětí pily vyšší než modulující signál, výstupem bude negativní část impulzů *(obrázek č.1.7.1).* [22, 23]



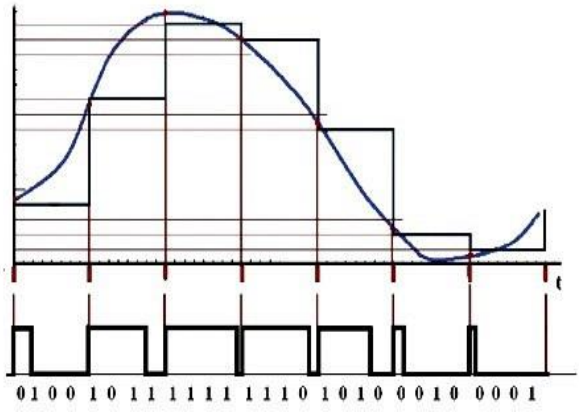
Popis obrázku č. 1.7.1.:
Jedna z dvojúrovňových metod PWM používajících analogový komparátor. «Pilové» napětí z pomocného generátoru je aplikováno na jeden ze vstupů komparátoru a na druhý vstup je aplikováno modulační napětí. Výstupní stav komparátoru je PWM modulace. Shora – «pilový» signál a modulační napětí, zespodu - výsledek PWM.

Obrázek č. 1.7.1. Analogové PWM [22]

1.7.2. Digitální pulzně šířková modulace

Digitální PWM se používá v digitální technice. Výstupní impulzy mají dva stavy (zapnuto nebo vypnuto). V tomto případě je signál získán pomocí N-bitového čítače. Impulzy mohou být v libovolném místě periody *(obrázek č. 1.7.2.)*. [22,23]

Poměr celkové délky trvání impulzu k času zapnutí (kladná část impulsu) se nazývá střída. V tomto případě PWM signály byly simulované mikroprocesorem Atmega 2560, což znamená, že PWM regulace je digitální. Podrobněji vysvětleno v návrhové částí projektu.

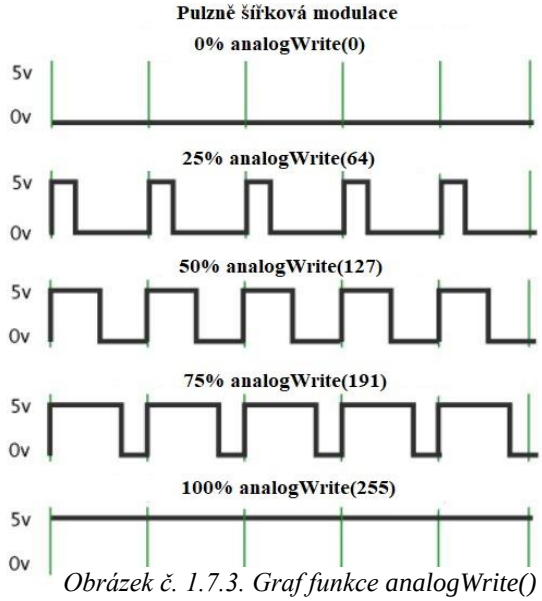


Obrázek č. 1.7.2. Příklad digitální PWM [6]

1.7.3. PWM signál v Arduino

Tento signál simuluje napětí mezi maximální hodnotou (5 V) a minimální hodnotou (0 V), změnou délky spínací doby 5 V vzhledem k 0 V. Délka maximální hodnoty se nazývá šířka impulzů. Pro vytvoření různých středních hodnot se mění šířka impulzů.

Na *obrázku č. 1.7.3.* zobrazují čáry konstantní časové úseky. Doba trvání je nepřímo úměrná frekvenci PWM, tj. pokud je frekvence PWM 500 Hz, svislé čáry označí intervaly každé 2 milisekundy. Volání funkce analogWrite() v měřítku od 0 do 255 znamená, že hodnota analogWrite(255) bude odpovídat 100% pracovnímu cyklu (konstantní 5 V) a analogWrite(127) - 50% pracovnímu cyklu. Simulování PWM generátoru je uvedeno v kapitole 4.2.4 (Zdrojový kód). [6]



Obrázek č. 1.7.3. Graf funkce analogWrite() [6]

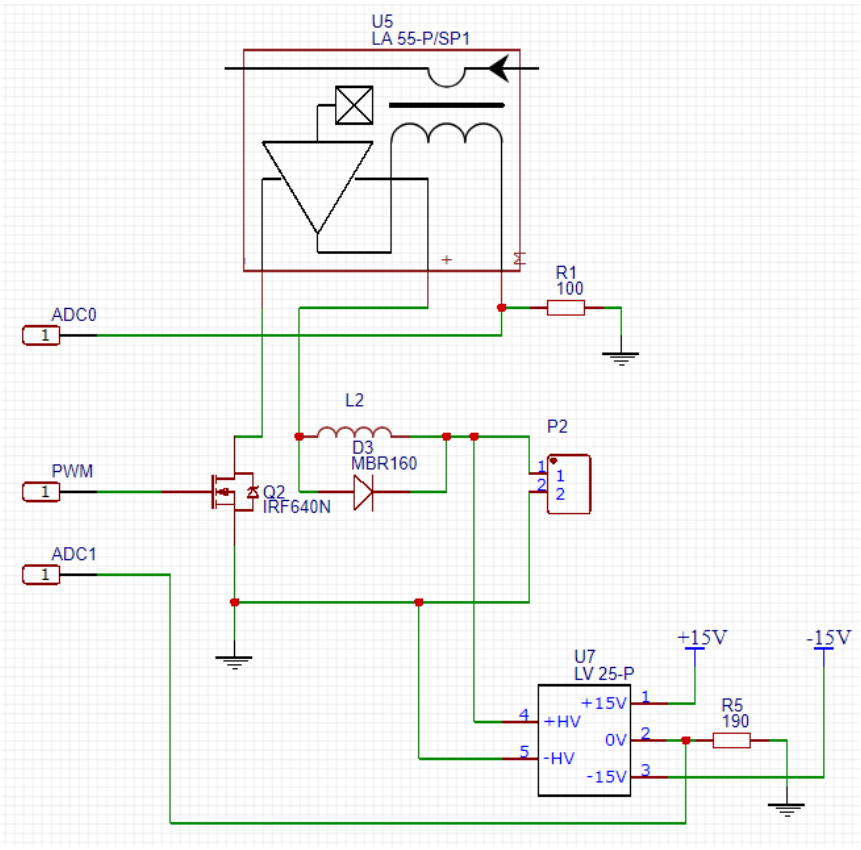
2. Návrhová část

2.1. Senzory měření a ostatní prvky pro realizaci schématu

Pro vyřešení úkolu byl vyvinut systém pro záznam voltampérových charakteristik solárního panelu. Pro registraci charakteristiky je nutné měřit napětí a proud na solárním panelu. Za tím účelem bylo navrhnuto schéma zapojení senzorů proudu a napětí k mikrokontroléru ArduinoNANO, který bude řídit celé zařízení automaticky.

- Byla použita cívka o indukčnosti 25 mH.
- Pro řízení vstupního proudu byl použit tranzistor n-typu IRF640, který byl řízen PWM generátorem.
- PWM generátor byl nasimulován mikroprocesorem Atmega328P.
- Pro stanovení napětí byl použit napěťový senzor značky LEM typu LV25.
- Proud byl měřen senzorem proudu značky LEM typu LV55-P.
- Pro zabezpečení spojení modulů s počítačem se používal mikroprocesor Atmega328P na desce Arduino.
- Naměřené charakteristiky se ukládaly na paměťovou SD kartu HAMA Class4 2 GB pomocí čtečky karet Arduino SD card Module.
- Program je vytvořen v programovacím prostředí Wiring ve vývojovém prostředí Arduino, který popsán v kapitole č. 4.2 (Software).
- Solární panel je použit jako zdroj napětí a proudu.

Tyto prvky byly zapojeny do obvodu, který lze vidět *na obrázku č. 2.1*. Tento obvod ukazuje, jak by se mělo postupovat v realizaci schématu zařízení. Celé schéma zapojení je v kapitole č. 2.3 (Schéma zapojení) a podrobný popis schématu je v kapitole č. 2.2 (Popis schématu celého zařízení). Názvy vstupů a výstupů schématu jsou uvedeny v tabulce č. 4.



Obrázek č. 2.1. Schéma zapojení pro další realizace (vytvořeno v prostředí EasyEDA)

Označení	Součástka	Popis
ADC0	Svorkovnice	Vstupní kontakt do Arduina pro senzor proudu
ADC1	Svorkovnice	Vstupní kontakt do Arduina pro senzor napětí
PWM	Svorkovnice	Vstupní kontakt do Arduino pro generátor
Q2	IRF640N	Tranzistor
L2	-	Indukční cívka
D3	MBR160	Dioda
P2	Kontakt	Svorka pro solární panel
U5	LEM LA55-P	Senzor proudu
U7	LEM LV25-P	Senzor napětí
+15V	Kontakt	Zapojení do zdroje napětí
-15V	Kontakt	Zapojení do zdroje napětí

Tabulka č. 4. Seznam součástek v schématu

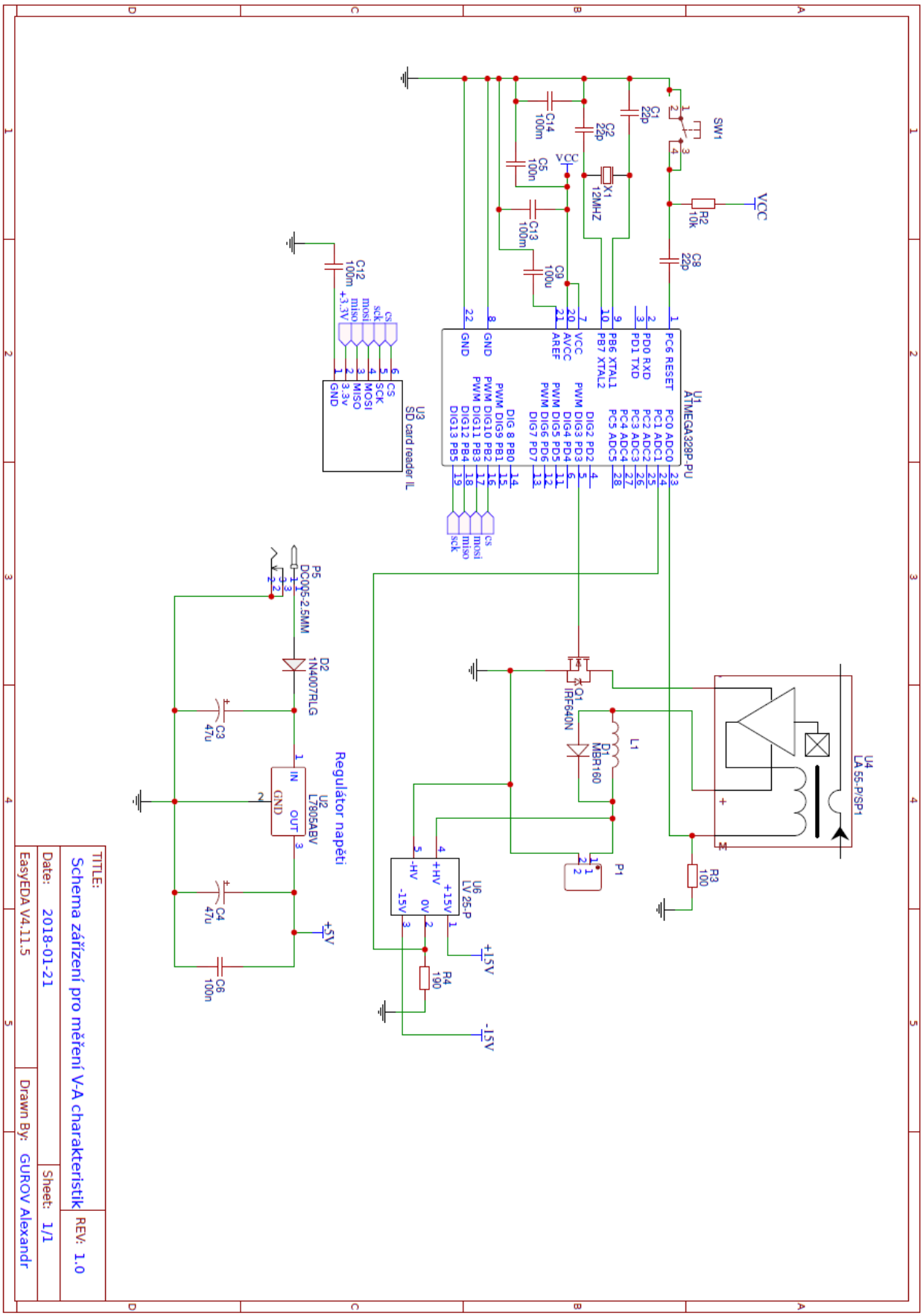
Systém umožnil provádět experimenty pro měření charakteristik solárních panelů a ukládat data na SD kartu, následně automatizovat proces provádění experimentů a tím zkrátit čas na zaznamenání charakteristik.

2.2. Popis schématu celého zařízení

Na obrázku č. 2. 3. je znázorněno finální řešení návrhové části.

Pro řízení mého zařízení je použit mikrokontrolér Arduino Nano s mikroprocesorem Atmega328P, který je označen U1. V levé části schématu jsou prvky Arduino, tento obvod byl převzat z technické dokumentace mikrokontroléru *[Datasheet Arduino NANO] [14]*. V pravé částí se nacházejí součástky na realizaci celého zařízení, které jsou navrhnuté mnou. Na ukládání dat je použita SD karta HAMA 2GB, která je vložená do modulu čtení karet s názvem «SD Card Module Slot Socket Reader». Pomocí toho modulu se SD karta spojuje s mikrokontrolérem pomocí šesti kontaktů. Pro zapojení celého zařízení do sítě byl použit stabilizátor pevného napětí L7805ABV *[Datasheet Stabilizátoru pěvného napětí L7805ABV] [18]*. Pro měření proudu je zde použita Hallova sonda značky LEM typu LA55P s rozsahem proudů 0-50 A. Pro měření napětí byla použita Hallova sonda značky LEM typu LV25P s rozsahem napětí 10-500 V.

2.3. Schéma zapojení



Obrázek č. 2.3. Schéma automatického zařízení (vytvořeno v prostředí EasyEDA)

3. Realizační část

Realizační část vysvětluje realizaci celého automatického zařízení a problém zapojení všech prvků mezi sebou podle schématu, které bylo uvedeno v kapitole č. 2.2 (Popis schématu celého zařízení) tak, aby měřicí zařízení bylo univerzální pro všechny typy solárních panelů.

Bylo rozhodnuto udělat základní desku, na které bude zapojen modul SD karty, Arduino Nano, obvod s regulátorem napětí, obvod stabilizátoru pevného napětí a čtyři svorkovnice pro připojení zátěže, senzorů proudu a napětí, a solárního panelu. Tímto způsobem se k základní desce dá připojit nebo nahradit jakýkoliv senzor, změnit zátěž a změnit solární panel.

3.1. Výroba plošných spojů

Pro tvorbu vlastního plošného spoje existuje mnoho druhů programů, které jsou zaměřené na návrh plošného spoje. Profesionální programy jsou velmi drahé, ale některé jsou k dispozici zdarma. K nim patří EasyEDA, který byl použit v mojí bakalářské práci.

3.1.1. EasyEda

Program easyEDA slouží k návrhu a realizaci desky plošných spojů. To je webová aplikace, kterou lze najít na webové stránce [easyeda.com]. [7]

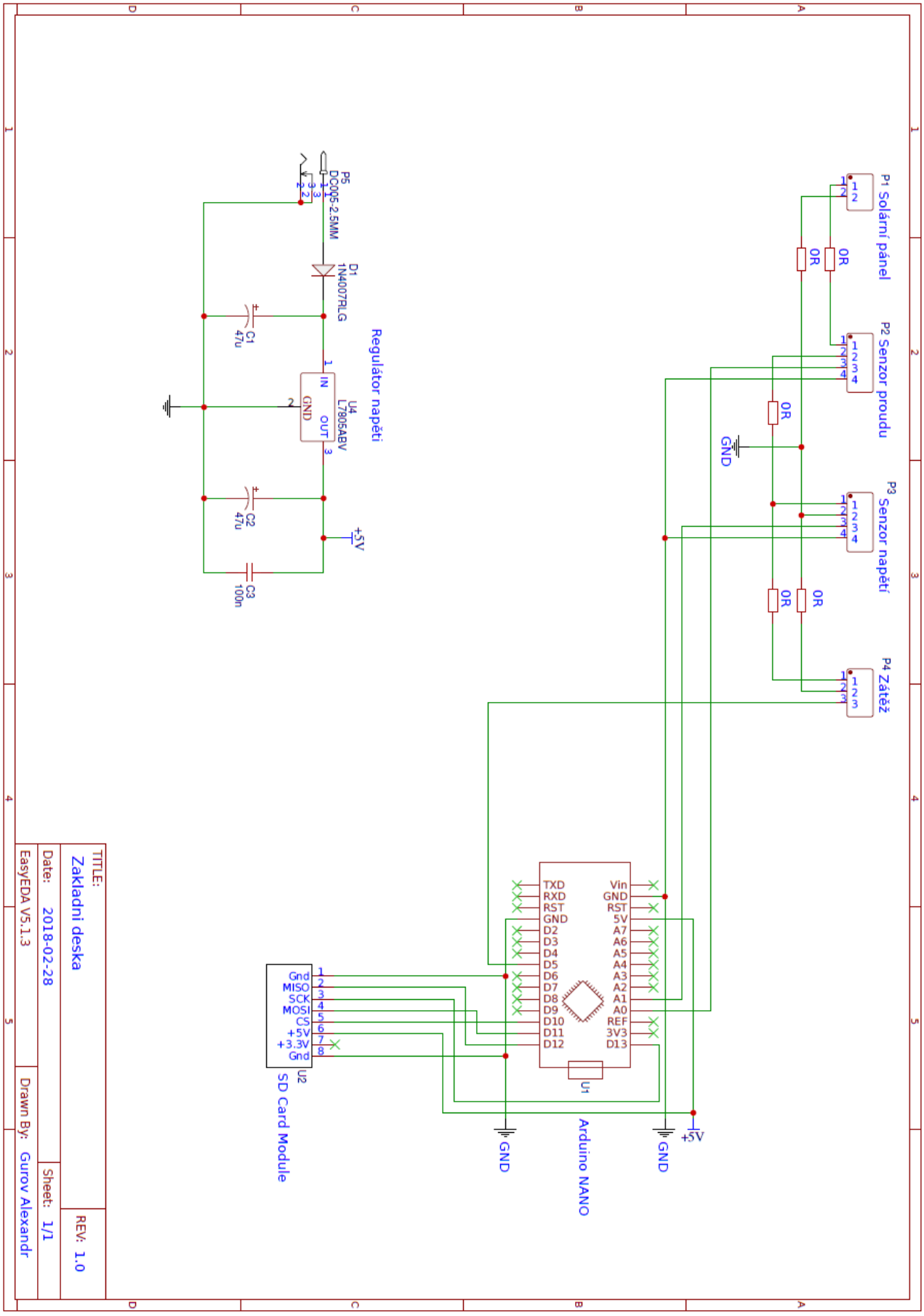
Je možné v něm vytvářet vlastní projekty, soubory a další jejich modifikace. Pomocí externích nástrojů lze soubory návrhů importovat do jiného programu a opačně, lze exportovat do různých formátů. Tato aplikace byla vybraná z několika důvodů:

- Licence je zadarmo a umožňuje využití pro nekomerční účely,
- Lze se přihlásit z jakéhokoliv místa na Zemi, funguje na principu "MS OneDrive", "Google drive" atd.
- S vytvořeným projektem může pracovat současné několik lidí, číst, opravovat a doplňovat.
- Lze zapnout na počítači, tabletu, chytrém mobilu,
- Potřeba je jen připojení k síti internet.
- Podporuje desky plošných spojů až o šestnácti vrstvách,
- Aplikace schopna exportovat data do PCB a umožňuje tedy profesionální návrh průmyslové plošné desky.

3.1.2. Schéma

V první řadě je potřeba vytvořit schéma zapojení. Do prázdného pole nahrajeme z knihovny součástek potřebné součástky, které budeme potřebovat. Pokud nám nějaká součástka nebude vyhovovat dle našich požadavků, není problém ji pomocí editoru upravit. Rozložené součástky spojíme pomocí nástrojů tak, aby obvod fungoval, jak má. Všechny součástky musíme očíslovat a nejlépe jim i přiřadit požadovanou hodnotu. Dále musíme vybrat pro každou součástku pouzdro, ve kterém bude osazena.

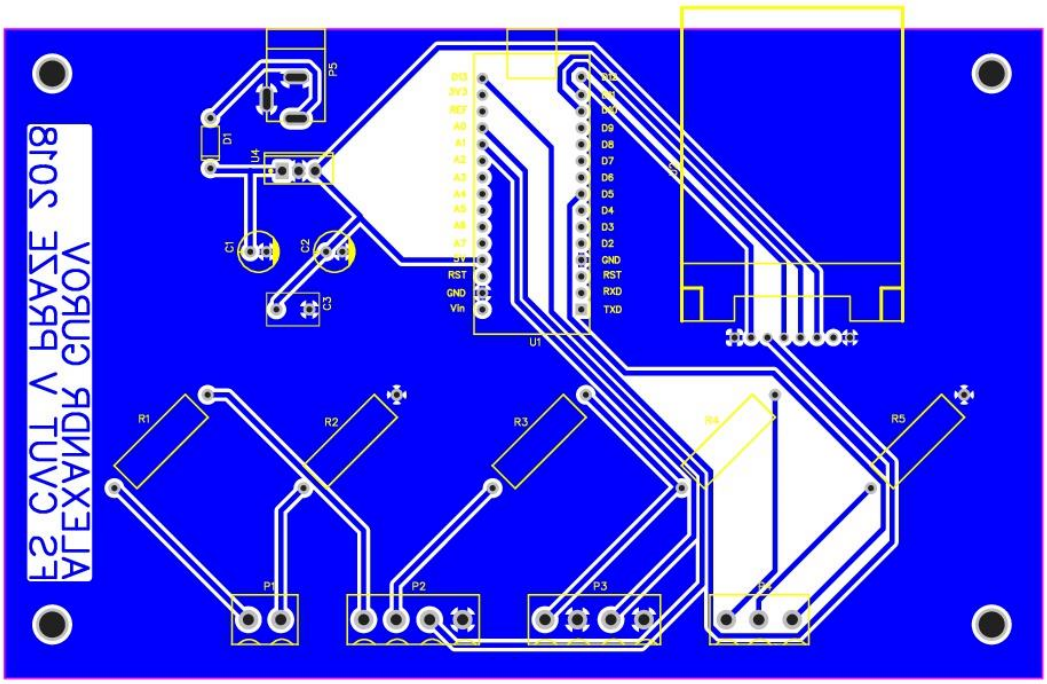
Na desce, která je uvedená na *obrázku č. 3.1.2*., jsou 4 svorkovnice: P2 a P3 jsou pro zapojení senzorů proudu a napětí, P1 pro zapojení solárního panelu a P4 pro zapojení zátěže. Dále je tu i mikrokontrolér Arduino NANO, který řídí celý proces měření. K Arduino je připojen modul SD karty. Napájení je možné realizovat pomocí přímého napojení 5 V. Stabilizátor KA78T05 lze napájet 7-37 V a jeho výstupní napětí lze nastavit pomocí napěťového děliče. V našem případě by napětí mělo být v rozsahu 2,7-5,5 V.



Obrázek č. 3.1.2. Schéma zapojení senzorů k ArduinoNANO (vytvořeno v prostředí EasyEDA)

3.1.3. Návrh samotné desky

Po otevření editoru na tvorbu plošného spoje otevřeme principiální schéma zapojení všech prvků a uděláme konverzi do PCB souboru. V PCB souboru jsou všechny součástky generované na jedno místo, je tedy potřeba je rozmístit. Před rozmístěním prvků musíme dávat pozor na pravidla tvorby plošných spojů. Nejdůležitějším pravidlem při tvorbě základní desky je to, že se cesty nesmějí křížit. Editor nám ukáže, jaké součástky je potřeba spojit. V pravé části pracovní plochy je ovládací panel, ve kterém dá se nastavit tloušťka spoje. Po nastavování tloušťky spojů byla používaná funkce automatického rozmístění cest na základní desce. Před exportováním PCB do PDF souboru je třeba udělat montážní díry pro upevnění desky, nebo pro udělání nožek v případě, že to bude potřeba. Hotová deska dále byla vygenerovaná v PDF formátu na další zpracování.



Obrázek č. 3.1.3. Deska plošného spoje

3.1.4. Zhotovení základní desky

Zhotovení desky je možné různými způsoby. V mém projektu byla základní deska vyrobená leptáním. Osazení součástek bylo provedeno ručně. V případě potřeby je možné desku nechat vyrobit u specializované firmy, které se tímto zabývá.

Leptání - je odebírání vrstvy materiálu (v mém případě měď) z povrchu základní desky chemickou reakcí, která vzniká mezi materiálem desky a nástrojem, který tvoří chemická látka. V mé práci to byl roztok chloridu železa. Místa, která nemají byt vyleptána, třeba zakrýt maskou. Jako maska je použita fotovrstva (tloušťka cca 0.2mm).

Nejprve jsem koupil v obchodě fotocuprextit a vytisknul jsem PCB soubor ve formátu PDF na folie (tzv. ochrannou masku), abych mohl zakrýt fotocuprextit v těch místech, které by neměli být obráběné. Dále fotocuprextit byl vložen do skříně s ultrafialovým zářením a zakryt ochrannou maskou a přitisknut vakuem. Osvícení trvalo 5 minut. Po osvícení byl fotocuprexit vložen do lázně, obsahující roztok hydroxidu sodného, na 5 minut. Tímto způsobem byla odebrána fotovrstva. Posledním krokem výroby základní desky je lázeň, obsahující roztok chloridu železa, jak bylo uvedeno výše, a to se nazývá leptání. Deska byla vložena do lázně na 30 minut, po uplynutí času byla měď odebrána v požadovaných místech, dále deska byla spláchnuta vodou, potom lze vidět hotovou desku, připravenou na další pájení.

3.1.5. Pájení a kontrola spojů

Po leptání desky byla provedena kontrola kvality všech cest na plošných spojích, a deska byla připravena k pájení.

Pájení je způsob spojování součástí pájkou s nižší teplotou tavení než spojované součástí, které při pájení nebudou roztavené. V mé práce pájení se provádělo ručně a postupně.

K desce byl připájen modul SD karty, mikrokontrolér ArduinoNano, součástky stabilizátoru pevného napětí a konektory na zapojení modulu napětí, modulu proudu a na zapojení solárního panelu.

4. Arduino

Arduino vzniklo jako elektronická platforma, která by byla dostupná pro studenty. Vývoj začal v roce 2005 v Itálii. Skupina lidí z Interaction Design Institute měla za cíl navrhnout a sestavit desku pro co nejširší použití za nejméně peněz. Po vydání první verze elektronické desky si ji studenti velmi oblíbili. Hlavním důvodem, proč bylo a je Arduino velmi oblíbené a tak nejrozšířenější elektronická platforma, je fakt, že tvůrci vytvořili tuto elektronickou platformu jako podporu pro studenty. Proto je Arduino tzv. Open Source a tedy všechna schémata a návrhy jsou volně ke stažení a vlastní produkci. Za dlouhé roky vznikla spousta dalších verzí Arduina, především jejich klony, které se dají zakoupit za zlomek ceny originální desky. Společně s Arduinem se dají zakoupit také různé senzory a pomůcky, které podpoří náš projekt. [6]

4.1. Arduino NANO

Arduino NANO *(obrázek č. 4. 1.)* je nejrozšířenější platformou a vyskytuje se jako mini kopie Arduino Uno. Má čip ATmega328P osazený do patice. Na rozdíl od Arduino UNO, Nano nemá napájecí blok napětí a u něj není možné vyměnit čip. Dalším blokem je rozhraní USB, které umožňuje přenos programu do čipu. Hlavní přednost AN je série analogových a digitálních vstupů/výstupů, které umožňují připojit či řídit různé senzory nebo jiná zařízení. Analogový blok je pouze na čtení signálu, nelze jej použít jako výstup. Digitální vstupy naopak lze využít jako výstupy. Logika digitálních vstupů/výstupů je realizována pomocí 1 a 0, kdy 0 je reprezentovaná napětím 0 V, tedy LOW. Logická hodnota 1 je reprezentována napětím 5 V, tedy HIGH. Důležitou součástí Arduina jsou piny A5, A1 a A0. Na tyto piny jsou připojeny zátěž, senzor proudu a senzor napětí. Technická specifikace AN uvedena v *tabulce č. 5.* Podrobnější parametry a specifikace jsou dány v příloze *[Datasheet Arduino NANO] [14]*. [14]

Obrázek č. 4.1. Arduino NANO [14]

Technická specifikace:

Mikrokontrolér	**Atmel Atmega328**
Operační napětí	5V
Vstupní napětí (doporučené)	7-12V
Vstupní napětí (limit)	6-20V
Digitální I/O Piny	14
Analogové vstupní Piny	8
DC proud na I/O Pin	40mA
Flash paměť	32KB (z toho 0.5KB využívá bootloader)
SRAM	2KB
EEPROM	1KB
Rychlost hodin	16MHz
Rozměry	0.73” x 1.70”

Tabulka č. 5. Specifikace Arduino NANO [14]

4.2. Software

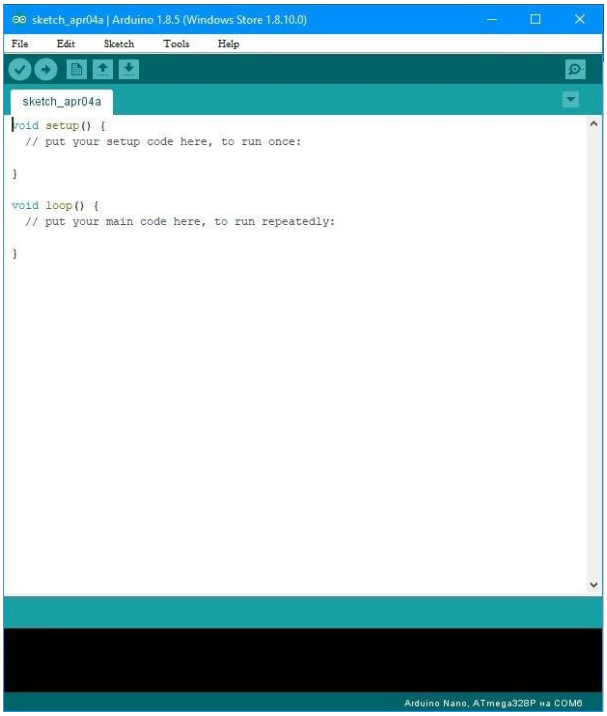
4.2.1. IDE

Programovací prostředí Arduina je jednoduché. Na začátku je potřeba pouze vybrat desku Arduino a port, ke kterému je připojena. Dále nás už jen zajímá ovládací panel, obsahující 5 ikonek: Verify, Upload, New, Open a Save *(obrázek č. 4.2.1.1.).* Popisy ikonek jsou uvedeny *v tabulce č. 6.*

Obrázek č. 4.2.1.1.
Ovládací panel IDE [6]

Verify	Slouží na ověření správné syntaxe programu.
Upload	Nástroj na nahrání programu do desky Arduino.
New	Nové okno pro nový program.
Open	Otevření dřívějšího programu z minulosti.
Save	Uložení postupu při psaní programu.

Tabulka č.6. Popis ovládacího panelu (zleva do prava)[6]



Obrázek č. 4.2.1.2. Arduino IDE [6]

4.2.2. Programovací jazyk

Programování Arduina je založené na jazyku C a C++. V tomto projektu byla používána knihovna jazyka C++ s názvem Wiring. Arduino IDE má tuto knihovnu implementovanou a je založené na jejím použití. Při otevření IDE se otevře nový projekt se základním kódem, což jsou základní 2 bloky void setup() a void loop() (obrázek č. 4.2.2.). Tyto 2 bloky musí program vždy obsahovat, i kdyby měly být prázdné, jinak by IDE ohlásilo chybnou hlášku při kompilaci.

Obrázek č. 4.2.2. Nový projekt se základním kodém [6]

- ***void setup()*** se spustí pouze jednou. Do tohoto bloku se píší různá nastavení pinů a zařízení.
- ***void loop()*** je smyčka, která se opakuje do nekonečna, dokud napájení nebude odpojeno, do nahrávání nového programu, nebo do zmáčknutí tlačítko "restart". Do tohoto bloku se píše hlavní logika celého programu.
- ***komentáře*** se píší pomocí dvojitého lomítka "//". Komentáře slouží k popsání různých částí kódu tak, aby každý příkaz byl pochopitelný, komentář se dělá pro přehlednost. Komentáře se nenahrávají do Arduina při kompilaci. [6]

4.2.3. Program pro zařízení

Po zapnutí Arduina se první spustí funkce *setup (),* kde se inicializuje sériová komunikace SD karty a nastaví pinCS pro další ukládaní dat, při tomto procesu lze vidět na obrazovce «Initializing SD card». Pokud se vyskytne chyba ve spojení Arduina a modulu SD karty, ukazuje se na obrazovce upozornění «Error opening LOG file» a tento krok se vrátí zpět na začátek programu. Pokud zapojení bylo provedeno správně a nedošlo k havárii, SD karta bude inicializovaná a to ukáže na obrazovce «SD Card Ready». Ve funkci setup() jsou uvedeny konstanty na kalibraci senzorů napětí a proudu, závislé na PWM generátoru.

Dále následuje funkce ***loop()***, která běží stále dokola, dokud nedojde k odpojení Arduina od zdroje napětí. V teto práci je zdroj napětí USB kabel, nebo napájecí adapter. V této funkci běží program pro ukládání dat na SD kartu. Vytvoří se soubor «LOG.csv» a začíná se vytváření tabulky hodnot na sestrojení grafu voltampérové charakteristiky solárního panelu. Vzorový příklad lze vidět na obrázku č. 4.2.3. Podrobná tabulka je uvedena v příloze [LOG.csv] [6], která je uložená na CD. Pokud LOG soubor nebude otevřen, na obrazovce ukáže «Couldn't open LOG file». Ve funkci ***loop()*** se zároveň nacházejí příkazy pro fungování senzorů napětí a proudu, nastavuje se šířka impulzů generátoru PWM a probíhá počítání výkonu z naměřených hodnot. Co se týká generátoru PWM *(kapitola č. 1.7.3)*, ten funguje pomocí funkce ***for***, na začátku měření se začíná měnit šířka impulzů po pěti (0, n, n+5 ,255) se zastavením na 1µs. Kód senzorů napětí a proudu funguje následujícím způsobem, Arduino provádí součet naměřených hodnot 1000 krát s rychlosti 1µs, následně vynásobených kalibrační hodnotou, pak tyto hodnoty se dělí 1000. Dále se z hodnot proudu a napětí počítá výkon solárního panelu, pomocí vztahu:

$$P = U * I; [W]$$

Po ukončení cyklu, se nový cyklus začíná po době 1 sekundy, což ukazuje přikaz ***delay(1000)***. Celý cyklus probíhá v průběhu 10 sekund, ale rychlost dá se nastavit pomocí přikazu *delayMicroseconds()* každého senzoru. Při měření panelu si lze nastavit počet kroků (od 0 do 255), na který chceme měřit, to se dá udělat ve funkci ***for*** generátoru, změnou hodnoty ***g***.

PWM	Current [mA]	Voltage [V]	Power [W]
0	0	13,14	0
5	0,97	13,33	0,13
10	12,23	13,59	1,66
15	26,87	13,75	3,7
20	33,04	13,73	4,54
25	35,56	13,64	4,85
30	37,55	13,8	5,18
35	39,41	13,76	5,42
40	41,03	13,5	5,54
45	42,48	13,47	5,72
50	43,84	12,87	5,64

Obrázek č. 4.2.3. Vzorkový příklad tabulky naměřených hodnot

4.2.4. Zdrojový kód

Jak bylo uvedeno v kapitole č.2.1 *(Senzory měření a ostatní prvky pro realizaci schématu)*, softwarový program je vytvořen v programovacím prostředí IDE (podobný jazyku C) ve vlastním vývojovém prostředí Arduina – Wiring.

```
#include <SPI.h>        //zapnutí knihovny, která implementuje přenos dat přes rozhraní SPI
#include <SD.h>         //knihovna pro SD kartu
#include <math.h>       //knihovna pro matematické funkci
#define pinCS 10        //uvedení portu připojení SD karty do Arduino
int g = 0;              //konstanta generátoru
float Voltage = 0;      //konstanta napětí
float Amper = 0;        //konstanta proudu
float Power = 0;        //konstanta výkonu
double totalamps;       //inkrementační proměnna proudu

void setup() {                              //se spustí pouze jednou

        pinMode(5, OUTPUT);                 //Připojení generátoru do pinu č.5
        pinMode(10, OUTPUT);                //Připojení CS do pinu č.10 (output)
        Serial.begin(9600);                 //rychlost přenosu dat [bit/s]

Serial.println("Initializing SD card...");  //ukazuje na obrazovce, že prochází inicializace SD karty
 if (!SD.begin(pinCS)) {                    //Initialize Card
  Serial.println("initialization failed!");  //Pokud vyskytuje se porucha spojení SD karty, ukazuje
        return;                             // se chyba a začíná se tento cyklus znovu
 }
 Serial.println("SD Card Ready");           //SD karta je připravena.


//Vytvoření souboru LOG.csv na SD kartě
    File logFile = SD.open("LOG.csv", FILE_WRITE);
     if (logFile) {
       logFile.println(",  ,");
       String header = "PWM, Current [mA], Voltage [V], Power [W]";  //pojmenování sloupců
       logFile.println(header);
       logFile.close();
       Serial.println(header);
       }
     else {
      Serial.println("Error opening LOG file");    //pokud soubor nebude otevřen, vyskytuje se chyba
  }
}



//Kalibraci měření senzoru proudu
float getAmpereK(int x) {
   return 0.0546582*log(1.89688*x);              //kalibrační konstanta pro senzor proudu
}

// Kalibraci měření senzoru napětí
float getVoltageK(int x) {
   return -0.000281106*(x^2)
+0.000811628*x+0.171661; }                     //kalibrační konstanta pro senzor napětí
```

```
void loop() {                                   //do tohoto bloku se píši hlavní logiku celého program

//generátor
        for (int g = 0; g<=255; g+=5) {         //PWM od 0 do 5V, což 0-255
            analogWrite (5, g);                 //5-připojení generátoru do analogového vstupu č. 5.
            delayMicroseconds(0.3);             //počítáni hodnot s rychlosti 0.3[µs]

//Voltmeter
       for ( int i=0; i<1000; i++ ) {                       //přikaz součtu 1000 měřeni
         Voltage += analogRead(A1)*getVoltageK(g);          //vzorek na počítání napětí [V]
          delayMicroseconds(0.3);                           //zastaveni počítání na 0.3 [µs]
          }
          Voltage /= 1000;                                  //1000 měřeni děli se na 1000, pro zjištěni přesné
                                                            //hodnoty

//Ampermeter
        for ( int i=0; i<1000; i++ ) {                      //přikaz součtu 1000 měřeni
          Amper +=  analogRead(A0)*getAmpereK(g);           //vzorek na počítání proudu [mA]
          delayMicroseconds(0.3);                           //zastaveni počítání na 0.3 [µs]
          }
          Amper /= 1000;                                    //1000 měřeni děli se na 1000, pro zjištěni přesné
                                                            //hodnoty
//Wattmeter
           Power = (Voltage*Amper)/100;                     //Vzorek na počítání výkonu [mW]
           Power_W =Power/100;                              //Převedení [mW] do [W]

//Ukladání dat do SD karty
String dataString = String(g) + ", " + String(Amper) + ", " + String(Voltage)+ ", " + String(Power);
     File logFile = SD.open("LOG.csv", FILE_WRITE);
       if (logFile)
    {
          logFile.println(dataString);
          logFile.close();
          Serial.println(dataString);
    }
       else
{
          Serial.println("Couldn't open LOG file");         // Pokud soubor nebude otevřen, vyskytuje se
                                                            //chyba
}
}
          id++;
          delay(1000);                                      //zastaveni počítání na 1 [s]
}
```

5. Komunikace

5.1. SD karta

Secure Digital card (SD karta) je paměťová karta, která se používá v přenosných zařízeních, například notebooky, chytré telefony a fotoaparáty. Jako médium je použita flash paměť.

Flash paměť je elektricky zapisovatelná paměť. Paměť je vnitřně organizována po blocích. Paměť se používá jako paměť typu ROM. Tyto karty se používají jako základ kapacitních paměťových médií - karet, např. formátu SD, mini SD a micro SD. [15]

V mé práci byla používaná SD karta, značky HAMA, o kapacitě 2GB, kterou lze vidět na *obrázku č. 5.1*. Podrobná charakteristika karty je uvedená v příloze *[Datasheet SD Card] [6]*.

Obrázek č. 5.1. SD Karta Hama 4 Třídy. 2Gb [13]

Jak lze vidět na obrázku kartička má postranní vypínač, označený «Lock». Tento vypínač je určen na ochranu proti nechtěnému zápisu. Pokud je nastaven na «Lock», nelze na kartu nic ukládat ani měnit uložená data, pokud je nastaven na «Open», dá se měnit uložená data a zapisovat nové.

Rychlostní třídy SD karet definuje «SD Asociace», která udává pět rychlostních tříd karet: 0, 2, 4, 6 a 10. Třída SD popisuje rychlost zápisu dat na kartu v jednotkách MB/s (Megabyte za sekundu). Do nulté třídy patří všechny typy karet, které byly vyrobeny před zavedením specifikace tříd. Všechny ostatní třídy vyjadřují «výkonnost karty». Karta vyhovuje třídě, pokud je rychlost SD vyšší než požaduje třída. Rychlost zápisu závisí na velikosti bloku dat, který je ukládán jednou operací zápisu. Čím menší rozměr bloků, kterými se ukládá množství dat, tím nižší efektivní rychlost zápisu. V našem případě SD karta má 4. třídu, což znamená, že karta funguje o rychlosti 4MB/s. [15]

5.2. Modul SD karty pro Arduino

Modul umožňuje ukládat, číst a zapisovat na SD kartu údaje, které jsou potřebné pro ovládání zařízení na základě jakékoliv vývojové desky Arduino. Byla použitá karta o kapacitě 2Gb, která je uvedena v kapitole č. 5.1 (SD karta).

Obrázek č. 5. 2. SD Card Module for Arduino [12]

Deska MSD obsahuje místo pro vkládání SD karty, stabilizátor napětí, konektor pro připojení k mikrokontroléru a konektor napájecího rozhraní *(obrázek č. 5.2.)*. Komunikace s vývojovými kity probíhá přes sériové rozhraní SPI (Serial Peripheral Interface). [12]

MSD je snadno připojitelný jako periferie k Arduinu a k Raspberry PI bez dalších externích komponent. Specifikace modulu jsou uvedeny v příloze *[Datasheet SD Card module] [12]*.

6. Testování

Prvním krokem testovací části je připojení všech prvků do svorkovnic zařízení.

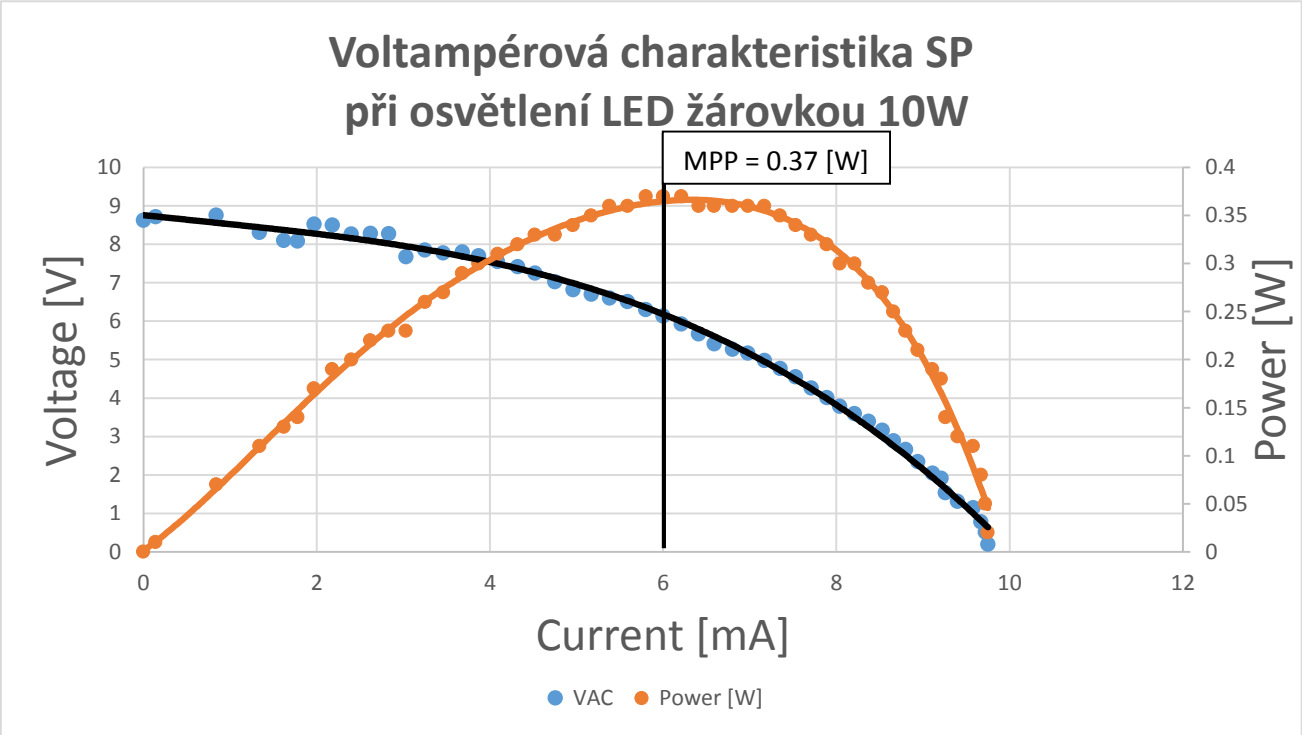
Druhým krokem je zapojení celého zařízení do sítě, nebo přes USB k počítači. Začne svítit červená světelná dioda «PWR» (Power), což signalizuje zapojení, a dioda «L» (LED), která ukazuje, že nahraný program běží. V tomto stavu už probíhá měření světelného záření, dopadajícího na SP.

Bylo provedeno několik měření a naměřené hodnoty byly uložené na SD kartu do souboru «LOG.csv», poté v programu MS Excel byl vytvořen graf voltampérové charakteristiky.

Intenzita slunečního záření byla zjištěná pomocí aktinometru Voltcraft PL-110SM (*obrázek č. 6.1*).

Obrázek č.6.1. Solar Radiation Measuring Instrument Voltcraft PL-110SM

1. LED žárovka A60 10W 4000K E27 (*obr. č. 6. 3.*). ISZ = 0,4 W/m^2

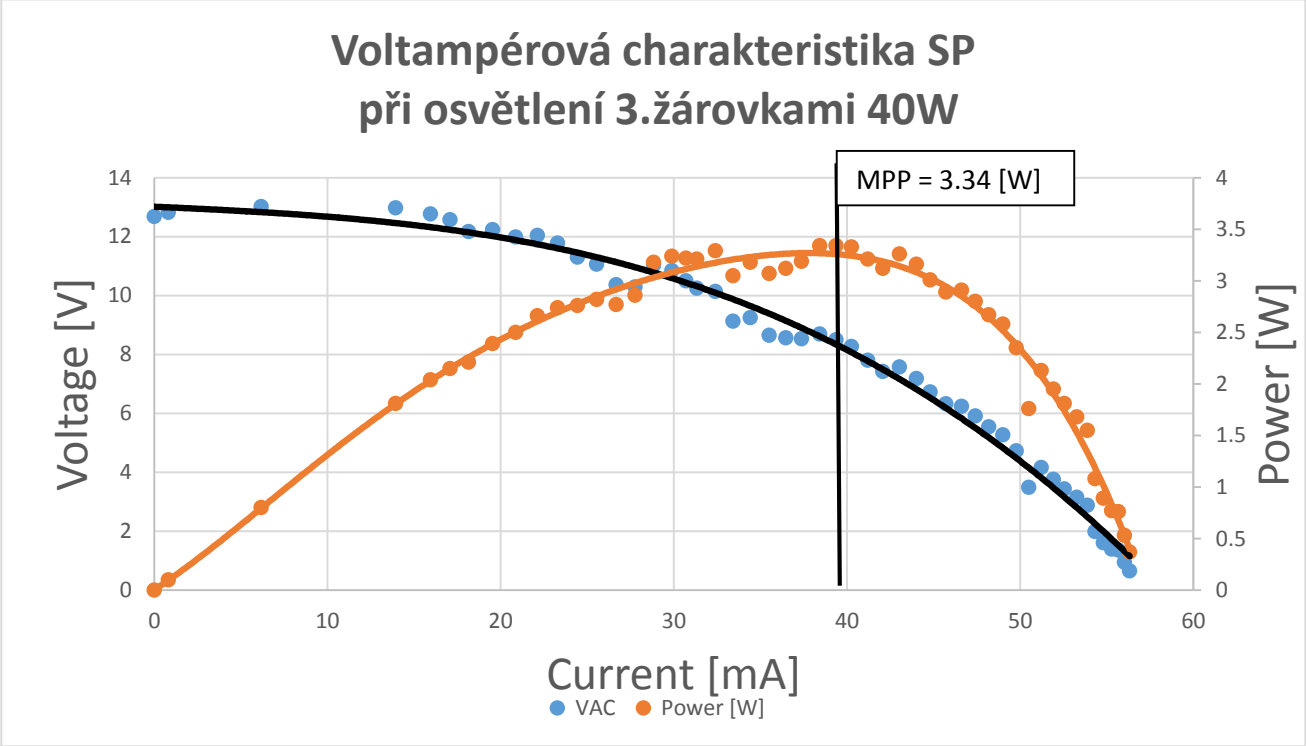


Graf č.1. VAC SP, při osvětlení LED žárovkou

Obrázek č. 6.2. Bílá LED žárovka A60 10W 4000K

2. Tři žárovky, každá o příkonu 40W *(obrázek č.6.5.)* $ISZ = 324\ {}^{W}/_{m^2}$

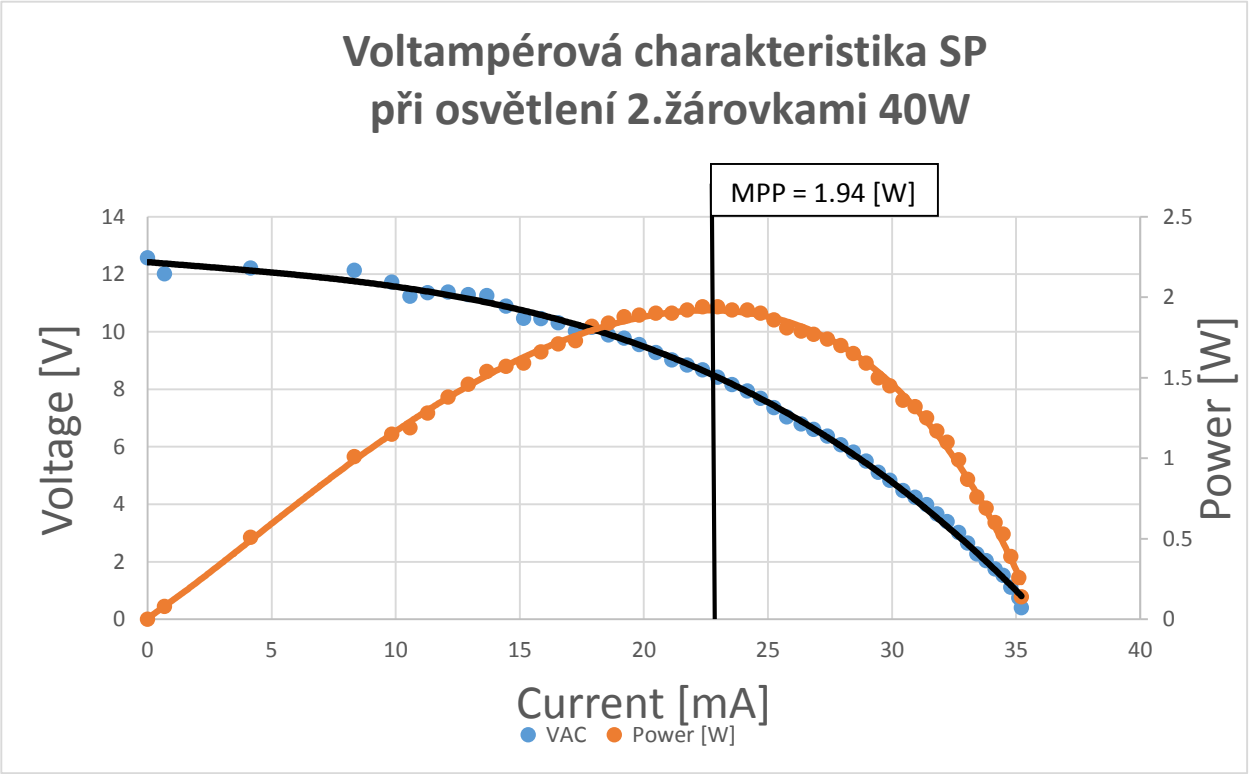
Obrázek č.6.3. Tři žárovky, každá o výkonu 40W



Graf č.2. VAC SP, při osvětlení třemi žárovkami

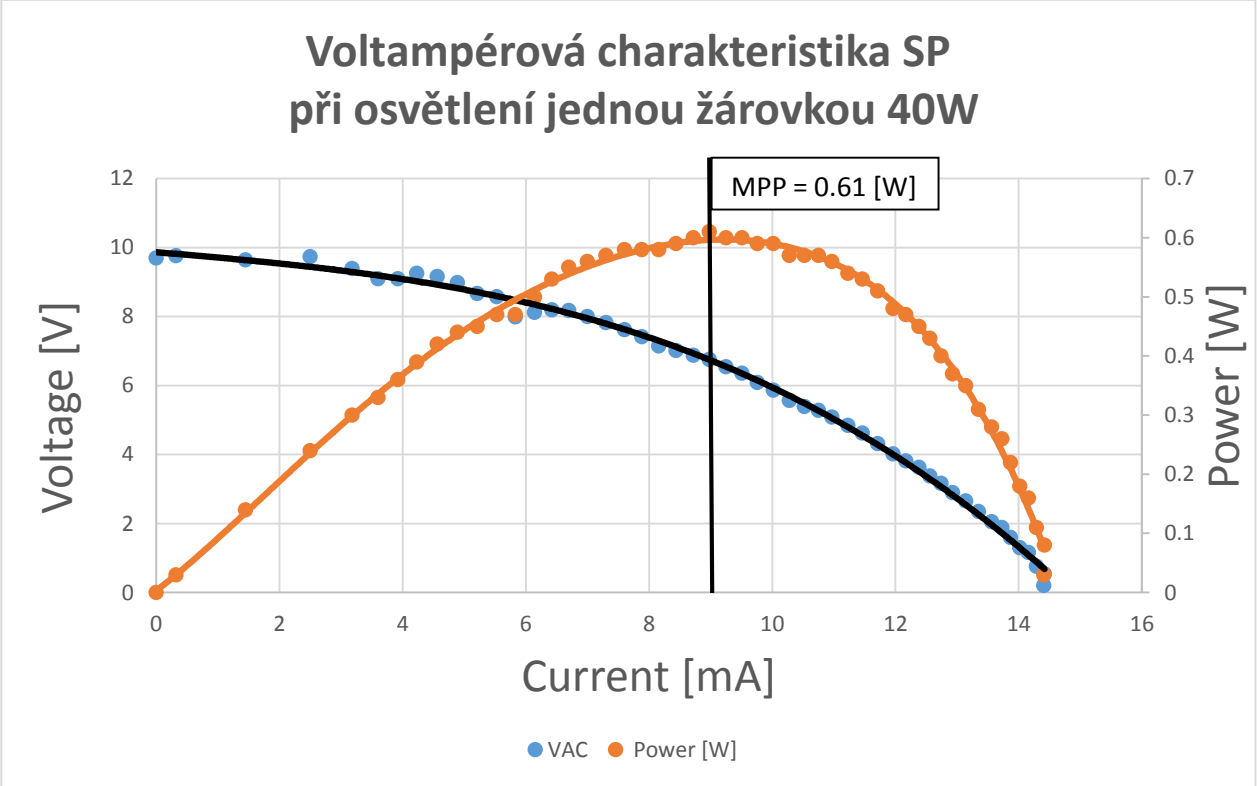
3. Dvě žárovky, každá o příkonu 40W *(obrázek č.6.6.)* $ISZ = 272\ {}^{W}/_{m^2}$

Obrázek č.6.4. Dvě žárovky, každá o výkonu 40W

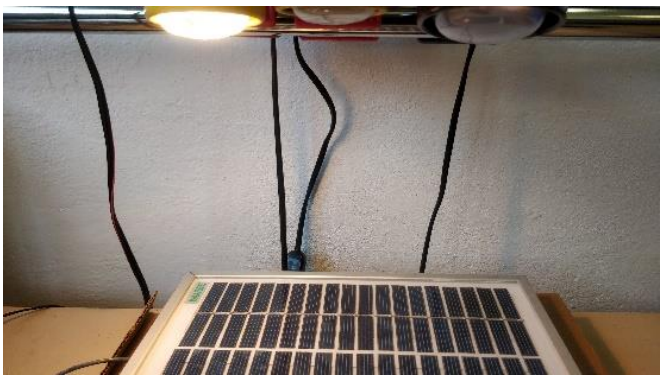


Graf č.3. VAC SP, při osvětlení dvěmi žárovkami

4. Jedna žárovka o příkonu 40W *(obrázek č.6.9.)* $\text{ISZ} = 74\ {}^{W}/_{m^2}$

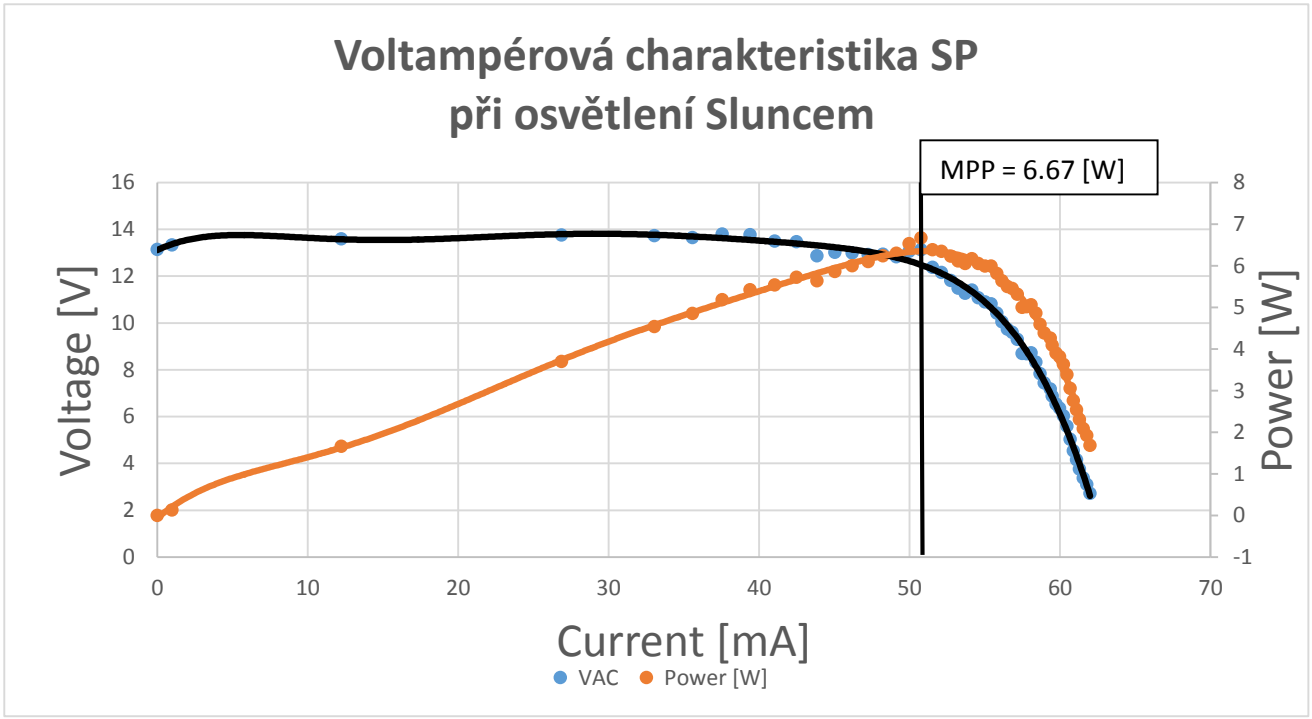


Graf č.4. VAC SP, při osvětlení jednou žárovkou o příkonu 40W



Obrázek č.6.5. Jedná žárovka o příkonu 40W

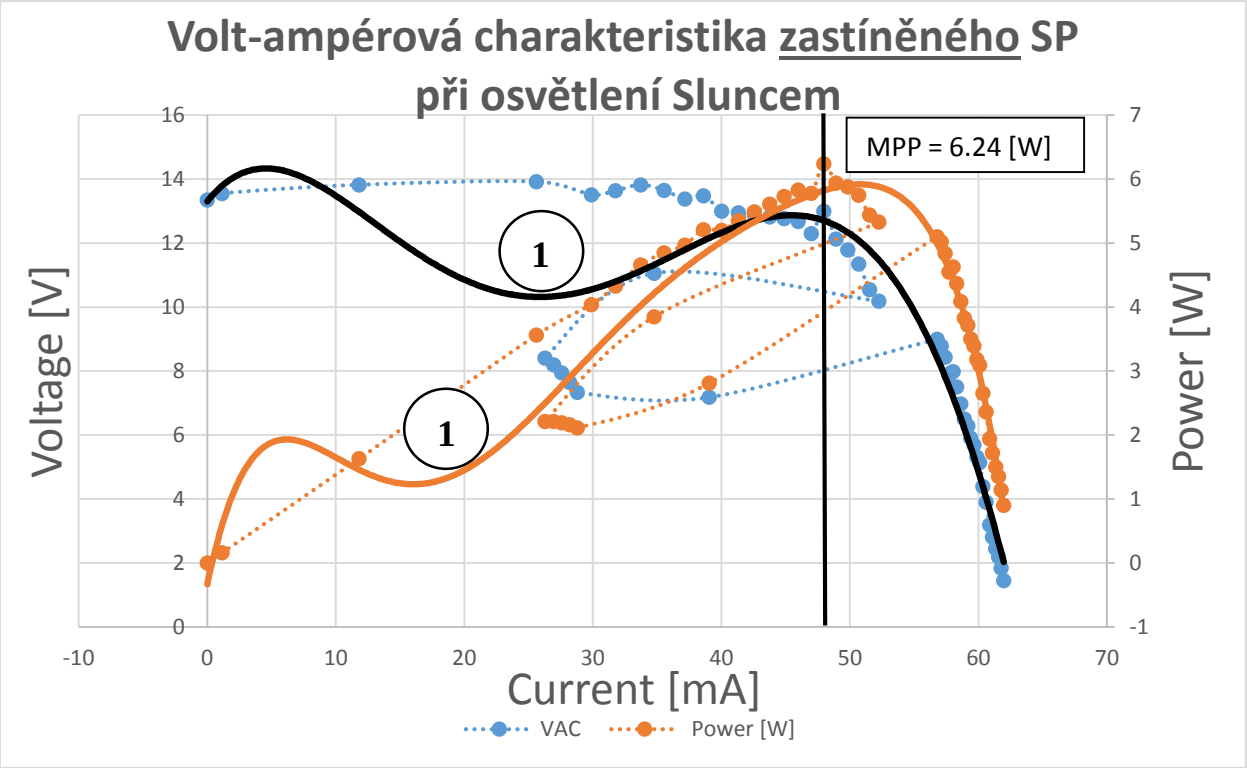
5. Osvětlení sluncem. ISZ $= 820\ {}^{W}/_{m^2}$



Graf č.5. VAC SP při osvětlení Sluncem

Obrázek č.6.6. Osvětlení panelu Sluncem

6. Osvětlení sluncem zastíněného solárního panelu ISZ $= 820\ {}^{W}/_{m^2}$



Graf č.6. VAC zastíněného SP při osvětlení Sluncem

Obrázek č.6.7. Osvětlení zastíněného panelu Sluncem

- 1....místo zastínění solárního panelu

Při měření voltampérové charakteristiky SP, panel zastíněn papírovým listem v průběhu měření od 115 do 150 PWM. V místech označených «jedničkou» lze vidět, že VAC klesá a postupně vzrůstá.

Číslo experimentu	Zdroj světla	Příkon zdroje světla [W]	ISZ [$^{W}/_{m^2}$]	MPP[W]
1	LED žárovka	10	0,4	0,37
2	Tři žárovky	40 (každá)	324	3,34
3	2 žárovky	40 (každá)	272	1,94
4	1 žárovka	40	74	0,61
5	Slunce	-	820	6,67
6	Slunce (stín)	-	820	6,24

Tabulka č. 7. Výsledky experimentů

Nejúčinnější voltampérová charakteristika SP je při osvětlení Slunečním zářením z ISZ = 820 $^{W}/_{m^2}$ a s bodem maximálního výkonu 6,67 [W]. Každý cyklus měření probíhal 10s, s periodou 1s. ISZ dopadajícího na panel závisí na úhlů dopadajících paprsků a na výkonu zdroje světla. Při testování zařízení paprsky světla dopadaly na panel pod úhlem přibližně 90 stupňů. V *tabulce č.7* jsou uvedeny výsledky každého experimentu.

Závěr

Tato práce se věnovala realizaci automatického zařízení pro měření voltampérových charakteristik fotovoltaických článků. Zařízení bylo navrhnuto a realizováno v podobě základní desky a z toho důvodu uživatel může změřit voltampérovou charakteristiku a maximální výkon libovolného solárního panelu, protože řešení umožňuje měnit senzory a zátěž, připojené k desce. Pro propojení navržené desky a PC byla použitá elektronická platforma Arduino NANO. Software je udělán tak, aby bylo možné připojit zařízení k panelu, zapnout do sítě/počítače a hned provádět měření. Software umožňuje ukládání naměřených dat do SD karty ve formátu «.csv», který se dá otevřít pomocí aplikace MS Office, pak z dat sestrojit potřebné grafy, buď samotné voltampérové charakteristiky, nebo spolu s křivkou výkonu. Dále po sestrojení grafů lze smazat uložena data z SD karty a začít znovu nové měření, nebo vložit kartu do zařízení zpět a pokračovat dál už v existujícím souboru. Přenos dat do SD karty je proveden pomocí modulu, připojeného k desce. V průběhu cyklu lze sledovat proces měření připojením Arduina do počítače pomocí USB kabelu. Celá sestava byla otestovaná pět krát s různými zdroji světla, byla provedená analýza experimentů a zjištěno při jakém osvětlení a při jaké intenzitě slunečního záření bude panel nejúčinnější. Zařízení funguje při hodnotách v rozsahu: 0/100 V stejnosměrného napětí a stejnosměrného proudu 0 až 3 A. Měření probíhá periodicky a krátkodobě (cca 10 s), zastavení mezi cykly 1s.

Vylepšení hardware zařízení:

Zde bych navrhoval do budoucna realizovat tělo zařízení, aby všechny součástky byly uloženy dohromady do jedné krabičky, jako například základní deska libovolného počítače. Tímto způsobem se dá zlepšit mobilita zařízení.

Vylepšení hardware panelu:

Když je zdrojem světla Slunce, panel se hodně zahřívá během procesu měření, učinnost panelu se s rostoucí teplotou snižuje a odpor pomalu vzrůstá, tím se vyskytuje odchylka měření. Pro n-počet měření záření Slunce bych postavil větrák na snížení teploty panelu a omezení odchylky, nebo by se dala měřit teplota.

Při měření VAC velkou roli hraje úhel dopadání paprsků na panel, zde bych navrhoval do budoucna realizovat připojení dvou krokových motorů a senzor slunce (sun senzor) na panel, aby panel automatický určoval nejbližší 90 stupnů úhel dopadajících paprsků.

Vylepšení software Arduino:

Zde by bylo vhodné upravit cyklus měření hodnot z panelu, tak aby toto čtení proběhlo tři krát a následně se zprůměrovalo a po ukončení cyklu signalizovalo LED diodou. Tato úprava by pomohla uživateli dat vědět, že měření proběhlo úspěšně.

Seznam obrázků

Obrázek č.1. Blokové schéma automatického zářízení....9
Obrázek.č.1.1. Solární panel Waaree WS-5/12V....10
Obrázek č. 1.2. Změna VA charakteristiky v závislosti na intenzitě slenečního záření....10
Obrázek.č.1.4.1. Toroidní cívka o indukčnosti 25mH....11
Obrázek č. 1.4.2. Struktura unipolárního tranzistoru IRF640....12
Obrázek č. 1.4.3.1. Struktura diody s p-n přechodem....13
Obrázek č. 1.4.3.2. Zapojení diody k cívce a procházení proudu cívkou....13
Obrázek č. 1.4.4. Schéma principiálního obvodu zátěže....13
Obrázek č. 1.5. Hallův jev....14
Obrázek č. 1.5.1 Senzor proudu s Hallovou sondou....14
Obrázek č. 1.5.2. Senzor proudu LEM LA-55P....14
Obrázek č. 1.6.1. Senzor napětí s Hallovou sondou....15
Obrázek č. 1.6.2. Senzor napětí vyplněný v elektronické verzi....15
Obrázek č. 1.6.3. Senzor napětí LEM LV25-P....15
Obrázek č. 1.7.1. Graf analogové PWM....17
Obrázek č. 1.7.2. Přiklad digitální PWM....17
Obrázek č. 1.7.3. Graf funkce analogWrite()....17
Obrázek č. 2.1. Schéma zapojení pro další realizace....18
Obrázek č. 2.3. Schéma automatického zařízení....20
Obrázek č. 3.1.2. Schéma zapojení senzorů k ArduinoNANO....22
Obrázek č. 3.1.3. Deska plošného spoje....22
Obrázek č. 4.1. Arduino NANO....23
Obrázek č. 4.2.1.1. Ovládací panel IDE....24
Obrázek č. 4.2.1.2. Arduino IDE....24
Obrázek č. 4.2.2. Nový projekt se základním kodém....25
Obrázek č.5.1. SD Karta Hama 4 Třídy. 2Gb....28
Obrázek č.5.2. SD Card Module for Arduino....28
Obrázek č. 6.1. Solar Radiation Measuring Instrument Voltcraft PL-110SM....29
Obrázek č. 6.2. Bílá LED žárovka A60 10W 4000K....29
Obrázek č. 6.3. Tři žárovky, každá o výkonu 40W....30
Obrázek č. 6.4. Dvě žárovky, každá o výkonu 40W....30
Obrázek č.6.5. Jedná žárovka o výkonu 40W....31
Obrázek č. 6.6. Osvětlení panelu Sluncem....32
Obrázek č.6.7. Osvětlení zastíněného panelu Sluncem....35

Seznam tabulek

Tabulka č. 1. Základní parametry tranzistoru IRF640 Vishay.....12
Tabulka č. 2. Tabulka pracovních hodnot senzoru proudu LEM LA-55P.....14
Tabulka č. 3. Tabulka pracovních hodnot senzoru napětí LEM LV25-P.....16
Tabulka č. 4. Seznam zapojených prvků v shématu.....19
Tabulka č. 5. Specifikace Arduino NANO.....24
Tabulka č. 6. Popis ovládacího panelu.....24
Tabulka č. 7. Výsledky experimentů.....32

Seznam grafů

Graf č.1. VAC SP, při osvětlení LED žárovkou.....29
Graf č.2. VAC SP, při osvětlení třemi žárovkami.....30
Graf č.3. VAC SP, při osvětlení dvěmi žárovkami.....31
Graf č.4. VAC SP, při osvětlení jednou žárovkou o výkonu 40W.....31
Graf č.5. VAC SP při osvětlení Sluncem.....32
Graf č.6. VAC zastíněného SP při osvětlení Sluncem.....35

Seznam použitých zdrojů

[1] Li J., Liu Y., Bo X. (2012) The Research of Maximum Power Point Tracking Method for Photovoltaic System. In: Zhang Y. (eds) Future Wireless Networks and Information Systems. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 144. Springer, Berlin, Heidelberg, Ratna Ika Putri, Sapto Wibowo, Muhamad Rifa?i, Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic Using Incremental Conductance Method, Energy Procedia, Volume 68, 2015, Pages 22-30, ISSN 1876-6102.

[2] GORYUNOV, N.N. a Y.R. NOSOV. Полупроводниковые диоды. Параметры, методы измерений: Polovodičové diody. Parametry, metody změření. *Toroid* [online]. Istra-2: ООО «Тороид» (OOO "Toroid"), 1968 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <http://www.toroid.ru/gorunovNN.html>

[3] DANILOV, Andrey. Современные промышленные датчики тока: Moderní průmyslové snímače proudu. *Современная электроника: Moderní elektronika* [online]. Moskva: STA-PRESS, 2018 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <https://www.soel.ru/upload/clouds/1/iblock/6fc/6fc9682474ac98ea43ffdab5b08fbd92/200401026.pdf>

[4] GURTOV, V.A. *Твердотельная электроника: Elektronika*. ПетрГУ/PetrGU. Петрозаводск/Petrozavodsk, 2004. ISBN 5-8021-0319-1.

[5] UHLÍŘ, Ivan. *Elektrické stroje a pohony*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03730-0.

[6] Arduino. *Arduino* [online]. Italia: Arduino Software, 2018Arduino [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/>

[7] EasyEDA: Navrhovací prostředí elektronických schémat a plošných spojů. *EasyEDA - Online PCB Design & circuit simulator* [online]. China: EasyEDA, 2018EasyEDA [cit. 2018-01-05]. Dostupné z: <https://easyeda.com/>

[8] Datasheet senzoru proudu LEM LA55-P. *Farnell - Distributor Elektronických součástek* [online]. Premier Farnell UK Limited: Farnell element14, 2018 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/1639877.pdf>

[9] Datasheet senzoru napětí LEM LV25-P. *LEM* [online]. ČR, Ostrava/Klobov: PE&ED, spol., 2018 [cit. 2018-04-03]. Dostupné z: <http://www.europowercomponents.com/media/uploads/LV25-P-SP2.pdf>

[10] Datasheet solárního panelu Waaree WS-5/12V. *GMElectronic* [online]. ČR, Praha: GM electronic, spol., 2018 [cit. 2018-04-03]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.522-087.1.pdf>

[11] Datasheet tranzistoru Power MOSFET Vishay IRF640. *Vishay - manufacturer of discrete semiconductors and passive components*[online]. USA, Pennsylvania.: Vishay Intertechnology, 2018 [cit. 2018-04-03]. Dostupné z: <http://www.vishay.com/docs/91036/sihf640.pdf>

[12] Datasheet modulu SD karty. *Eclipsera s.r.o.*[online]. ČR, Havlíčkův Brod: ECLIPSERA s.r.o, 2018 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.772-145.1.pdf>

[13] Datasheet SD karty: Hama 4GB Class 4. *Farnell element - Distributor elektronických součástek*[online]. Premier Farnell UK Limited: A Premier Farnell Company, 2018 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/2575658.pdf>

[14] Datasheet Arduino Nano v.2.3. User Manual. *Arduino* [online]. Italy: Arduino, 2018 [cit. 2018-04-03]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/en/uploads/Main/ArduinoNanoManual23.pdf>

[15] *SD Association* [online]. USA: Global Inventures, 2018 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <https://www.sdcard.org/>

[16] Snímače elektrického proudu s Hallovou sondou. *Honeywell* [online]. USA: Honeywell International, 2018, 2018 [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/42134482-Snimaee-elektrickeho-proudu-s-hallovou-sondou.html>

[17] Výroba vinutých dílů pro elektroniku. *P&V Elektronic spol. s.r.o.* [online]. ČR Kasejovice: P&V ELEKTRONIC spol. s r.o, 2014 [cit. 2018-01-05]. Dostupné z: <http://www.pvelektronic.com/toroidni-tlumivky-a-prevodniky/11/2/detail/>

[18] Datasheet Stabilizátoru pevného napětí L7805ABV. In: *STMicroelectronics* [online]. USA: STMicroelectronics, 2012 [cit. 2018-04-03]. Dostupné z: <https://datasheet.ciiva.com/26904/l7805abv-26904497.pdf>

[19] Datasheet Diody MBR160. In: *Semiconductor and Integrated Circuit Devices: ON Semiconductor* [online]. USA: ON Semiconductor, 2018 [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/MBR150-D.PDF>

[20] Solární panely a jak na ně. *Solární panely_v2.cdr*[online]. Praha: GM electronic, spol., 2018 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.522-068.8.pdf>

[21] Nejpoužívanější pojmy ve fotovoltaice. *Technická zařízení budov* [online]. Praha: Topinfo, 2018 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/11772-nejpouzivanejsi-pojmy-ve-fotovoltaice>

[22] Школа для электрика: Electrical school. *Школа для электрика: статьи, советы, полезная информация: Škola elektrikáře* [online]. Moskva: electricalschool.info, 2018 [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: <http://electricalschool.info/electronica/1759-shirotno-impulsnaja-moduljacija.html>

[23] Преобразователи частоты – Элементарная база и схемотехника устройств силовой электроники.: Frekvenční měniče – Základní znalosti a elektrické obvody zařízení silové elektroniky. *Электрические сети, оборудование, документация, инструкции.: Elektrické sitě, zařízení, dokumentace, instrukce.* [online]. Ukraine: Kiev, 2016 [cit. 2018-04-03]. Dostupné z: <http://leg.co.ua/knigi/raznoe/elementnaya-baza-i-shemotehnika-ustroystv-silovoy-elektroniki.html>

[24] FAKTOR, Zdeněk. *Transformátory a cívky – vlastnosti materiálů a efektivní návrh transformátorů*. Praha: BEN – technická literatura, 2002. ISBN 80-86056-49-X.

[25] KLIMT, Kristián. *Měření VA charakteristik fotovoltaických článků*. Praha, 2016. Bakalářská práce. ČVUT v Práze. Vedoucí práce Ing. Pavel Hrzina Ph.D.

[26] Диод P-N Перехода и его характеристики: Dioda s PN přechodem a charakteristiky. *РадиоСхема: RadioSchéma* [online]. Moskva: http://radioschema.ru., 2018 [cit. 2018-03-24]. Dostupné z: <http://radioschema.ru/el-komponenty/diody/diod-p-n-perexoda-i-ego-xarakteristiki.html>

[27] Датчики тока и напряжения ABB: Senzory proudu a napětí. *Силовая электроника: Silnoproudá elektronika* [online]. Moskva: Finestreet, 2016, 2016 [cit. 2018-05-24]. Dostupné z: http://www.power-e.ru/pdf/2006_03_56.pdf