



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická
Katedra elektrotechnologie**

Měření VA charakteristik fotovoltaických článků

Measurement of VA characteristics of photovoltaic cells

Bakalářská práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Aplikovaná elektrotechnika

Autor bakalářské práce: Kristián Klímt

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Pavel Hrzina Ph.D.

Praha 2016

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektrotechnologie

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Kristián Klimt**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Obor: Aplikovaná elektrotechnika

Název tématu: **Měření VA charakteristik fotovoltaických článků**

Pokyny pro vypracování:

1. Realizujte číslicově řízený systém pro měření VA charakteristik FV článků.
2. V návrhu realizace využijte silovou a analogovou část sestavenou Ing. Martinem Horákem
3. Ověřte základní funkce systému a navrhňte případná další zlepšení.

Seznam odborné literatury:

- [1] Horák, M. - Vigner, V. (ed.): Advanced Measurement of Photovoltaic Cells. 2014.
ISBN 978-80-01-05499-4.
- [2] Datové listy použitých součástek
- [3] Jednoduchý DAQ systém , Kristián Klimt (ČVUT FEL 2016), Individuální projekt

Vedoucí: Ing. Pavel Hrzina, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2016/2017

L.S.

Ing. Karel Dušek, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 8. 3. 2016

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 27. 5. 2016

.....

Kristián Klímt

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu Ing. Pavlu Hrzinovi za podporu a cenné rady, které mě dovedli k úspěšnému dokončení bakalářské práce. Rád bych poděkoval i Ing. Martinu Horákovi za pomoc s měřeními a za užitečné rady.

Název bakalářské práce:

Měření VA charakteristik fotovoltaických článků

Abstrakt:

Tato bakalářská práce se zabývá automatizací procesu měření voltampérových charakteristik fotovoltaického článku. Práce navazuje na silovou část navrženou Ing. Martinem Horákem a Ing. Vojtěchem Vignerem, která umožňuje přesné měření zkratového proudu FV článku a to díky eliminaci parazitních odporů přívodů FV článku. Analogové signály ze silové části jsou převedeny do digitální podoby a následně zpracovány pomocí mikroprocesoru a odeslány do PC k vizualizaci. Předmětem této bakalářské práce je pouze získání a digitální zpracování (DAQ) měřených veličin spolu s digitálně analogovým řízením „silového“ přípravku.

Klíčová slova:

Voltampérová charakteristika, Fotovoltaický článek, Digitální zpracování dat, Elektronická platforma Arduino

Bachelor's Thesis title:

Measurement of VA characteristic of photovoltaic cells

Abstract:

This thesis deals with automating the process of measuring current-voltage characteristics of the photovoltaic cell. Work continues on the power unit designed by Ing. Martin Horak and Ing. Vojtech Vigneri, which allows accurate measurement of short-circuit current of a solar cell due to the elimination of the parasitic resistances leads the PV cell. Analog signals from power part are converted into digital form and then processed by a microprocessor and sent to the PC for visualization. The subject of this thesis is the only acquisition and digital processing (DAQ) measured quantities along with the digital analog control "strength" product.

Key words:

Current-voltage characteristic, Solar cell, Digital data processing, Electronic platform Arduino

Obsah

Seznam symbolů a zkratk.....	1
1 Úvod.....	2
2 Fotovoltaický článek	2
2.1 Základní parametry	2
2.2 Voltampérová charakteristika	3
2.3 MPP - bod maximálního výkonu	4
2.4 Obvyklé měření FV článku	4
3 Silová část	5
3.1 Schéma.....	6
3.2 Popis řešení	6
4 Slaboproudá část – A/D, D/A.....	7
4.1 Návrh.....	7
4.2 A/D a D/A převodníky	7
4.2.1 Princip	7
4.2.2 Požadavky	8
4.2.3 Konkrétně vybrané typy	8
4.3 Výroba plošných spojů.....	9
4.3.1 KiCad	9
4.3.2 Schéma	9
4.3.3 Návrh samotné desky	11
4.3.4 Zhotovení a osazení desky	12
5 Uživatelské prostředí - strana PC	12
5.1 Návrh.....	12
5.2 Blokový diagram.....	15
6 Arduino.....	16
6.1 Arduino Uno	16
6.2 Software	17
6.2.1 IDE.....	17
6.2.2 Programovací jazyk.....	18
6.2.3 Vlastní program.....	19
6.3 Blok, diagram.....	20
7 Komunikace.....	21
7.1 Sběrnice I ² C	21

7.2	Sběrnice USB.....	22
8	Testování	24
8.1	Testování slaboproudé části	24
8.2	Testování silové části	26
9	Závěr.....	32
	Seznam použité literatury.....	33
	Seznam obrázků	35
	Seznam tabulek	36
	Seznam příloh	37
	Přílohy.....	38

Seznam symbolů a zkratek

FV článek	Fotovoltaický článek
DAQ	data acquisition systems (systém sběru dat)
PC	personal computer (osobní počítač)
A/D	analog/digitál
D/A	digitál/analog
MPP	maximal power point (bod maximálního výkonu)
HW	hardware
VA char.	voltampérová charakteristika
VACH	voltampérová charakteristika
OZ	operační zesilovač
I ² C	Inter-Integrated Circuit (sběrnice)
COM	Communication port (seriový port)
SDA	Synchronous Data
SCL	Synchronous Clock
USB	Universal Serial Bus
IDE	Integrated Development Environment (vývojové prostředí)
R/W	read/write
NRZI	Non-return-to-zero inverted

1 Úvod

Hlavním cílem této bakalářské práce je automatizace procesu měření voltampérových charakteristik fotovoltaických článků. Práce navazuje na článek Ing. Martina Horáka a Ing. Vojtěcha Vignera, ve kterém byla popsána metoda měření FV článků, která eliminuje vliv vnitřního odporu měřicího přístroje (ampérmetru) a odporu propojovacích vodičů při měření VA charakteristiky FV článku [1]. Měření zkratového proudu FV článku pomocí samotného ampérmetru není přesné, vzhledem k tomu, že napětí článku se pohybuje okolo 0,6 V a při měření článku na krátko je úbytek napětí na bočníku běžného ampérmetru zhruba 0,2 V. Tento problém a současně i problém s odporem přírodních vodičů článku, řeší v silové a analogové části sestava Horáka a Vignera.

V původní konstrukci měřicího obvodu byl nastavován proud tekoucí článkem manuálně. Mým úkolem bylo tento proces zautomatizovat a urychlit tak, aby při měření VA charakteristiky nedocházelo k ohřátí měřeného vzorku a tím k posunu výsledné změřené VA charakteristiky. Aby bylo možné proces měření takto automatizovat, bylo potřeba zkonstruovat systém pro sběr dat (DAQ), který se skládá z A/D a D/A převodníků a řídicí mikroprocesorové platformy Arduino.

Posledním článkem celého systému je program (aplikace) napsaná v programovacím jazyku JAVA, která je spuštěna na PC. Prostřednictvím grafického rozhraní (GUI) je pak možné nastavit parametry (počet odebraných vzorků, rychlost vzorkování apod.). Dále jsou zde implementovány funkce pro grafické zobrazení změřeného průběhu VA charakteristiky měřeného FV článku a možnost uložit změřená data do textového souboru pro další zpracování. Výsledné změřené průběhy VA charakteristik pak budou porovnány s komerčním přístrojem PROVA 210.

2 Fotovoltaický článek

Fotovoltaický článek funguje díky jevu zvanému fotoelektrický jev, který je založený na principu uvolňování elektronů pomocí elektromagnetického záření. Samotný článek je křemíková destička s PN přechodem o maximální velikosti zhruba 25x25 cm. Hlavní charakteristikou je poměrně malé generované napětí oproti proudu, proto se tyto články sérioparalelně skládají do tzv. fotovoltaických panelů.

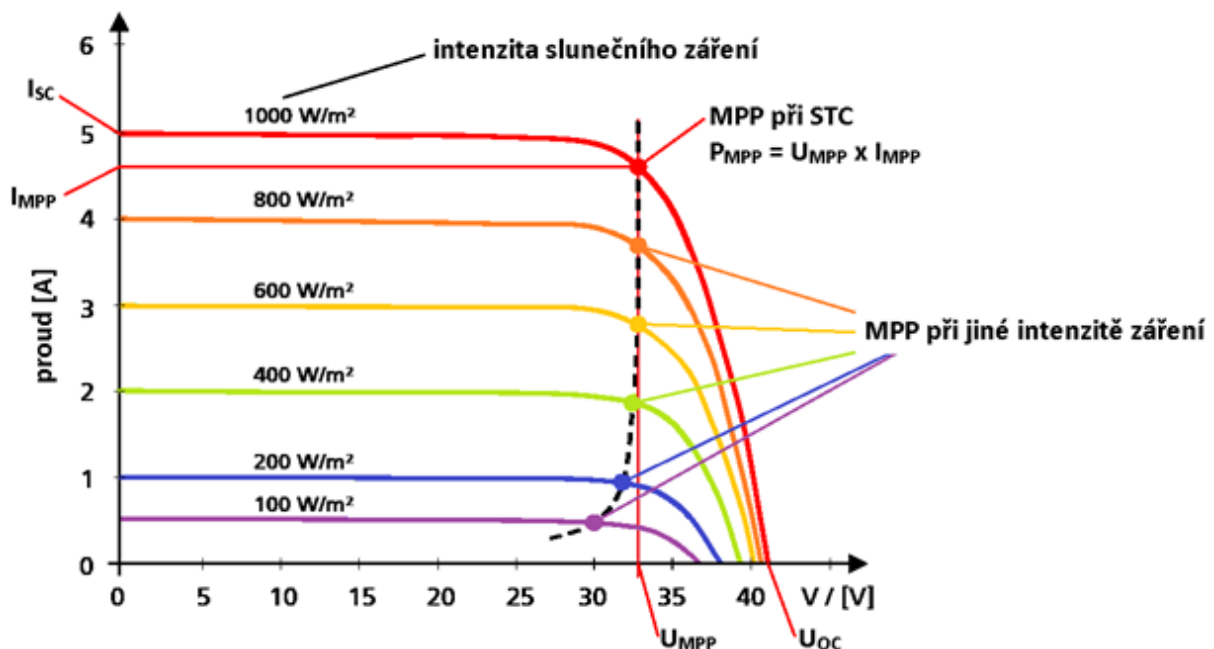
2.1 Základní parametry

Software a hardware byly navrženy pro měření malých veličin, tedy malého napětí a relativně malého proudu. Celá sestava je určena pro měření fotovoltaických článků, nikoli panelů. Předpokládáme, že se tedy budeme pohybovat v jednotkách napětí a proudu. Jeden článek má obvykle

jmenovité napětí na prázdko okolo 0,6 V a proud na krátko se může podle velikosti aktivní plochy pohybovat v řádu jednotek ampér. Nejčastější na trhu vyskytující se typy jsou z kategorie technologie tlustých vrstev. Je zde několik typů článků, polykrystalické, monokrystalické a amorfni. Obvyklá účinnost je v rozmezí 10 – 20 %. Polykrystalický a mono-krystalický solární článek se skládá z křemíkové destičky, která nabývá tloušťek v rozmezí 0,2 – 0,3 mm. Pro testování funkčnosti mého zařízení jsem použil pouze polykrystalické a monokrystalické články.

2.2 Voltampérová charakteristika

Voltampérová charakteristika fotovoltaického článku je jeden z jeho nejdůležitějších parametrů. Jak se mění VA charakteristika v závislosti na intenzitě slunečního záření lze vidět na obrázku č. 1. Základní vlastností je zratelná změna generovaného proudu na krátko při změně intenzity záření oproti relativně konstantnímu napětí na prázdko. Jak už jsem zmínil, tak tyto jednotlivé články se sérioparalelně skládají do tzv. solárního panelu. Pokud nebude mít tento panel žádné výrobní vady ani poškození vlivem času, bude mít stejnou VA charakteristiku jako jednotlivé články. V reálných podmínkách však hraje velkou roli různé zastínění jednotlivých článků tohoto panelu. Jak moc velkou roli takové zastínění bude mít, závisí na zvolené formě propojení jednotlivých článků. Snížení důsledků zastínění lze předejít přidáním paralelních diod k jednotlivým větvím. Příčinou může být zatažená obloha, ale také i zašpinění povrchu panelu. Za takových podmínek bude VA charakteristika značně deformovaná.



Obrázek 1: VA charakteristika FV článku [2]

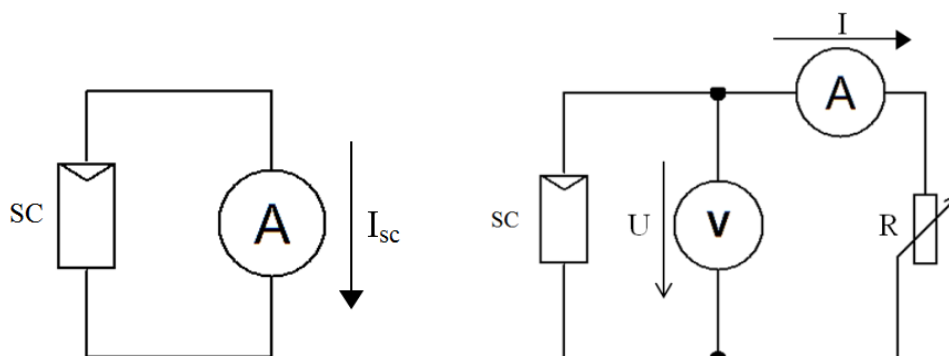
2.3 MPP - bod maximálního výkonu

Tento bod nám udává, při jakém zatížení proudu a napětí nám bude panel/článek dodávat maximální výkon. V obrázku č. 1 jej můžeme najít pod značkou MPP (maximal power point). Bod je velmi důležitý pro správnou funkci solární elektrárny, která využívá fotovoltaické články. Stejnoseměrné napětí generované elektrárnou je pomocí měničů přeměněno na střídavé napětí, které lze poté dodávat do sítě. Hlavní aspekt, který určuje, jak dobře budou panely využity, závisí na tom, jak budou měniče zatěžovat dané panely. Důležité je, aby měniče odebíraly proud co nejbližší k bodu MPP. Tím zajistí maximální účinnost panelu.

Svůj software jsem navrhl tak, aby si uživatel mohl pohodlně změřit libovolný fotovoltaický článek. Za předpokladu, že hardwarová část bude správně kalibrovaná, uživatel pouze připojí HW k PC a dále jen pomocí kolíků bude připojovat jednotlivé články. Software umožňuje ukládání naměřených dat a vygenerovaných grafů, naměřená data tedy lze použít pro další zpracování a porovnání. Graf zobrazuje VA charakteristiku měřeného FV článku, a také i jeho výkonovou závislost. Při měření článků si lze nastavit počet kroků, na který chceme měřit, ale i časový interval mezi jednotlivými kroky. Hned po změření nám program zobrazí maximální výkon, kterého článek dosáhl.

2.4 Obvyklé měření FV článku

Obvyklá metoda měření spočívá v zapojení ampérmetru a voltmetru společně s regulovatelným odporem jak je vidět na obrázku č. 2. Tato metoda je zdlouhavá vzhledem k nutnosti manuálního nastavování zatěžovací rezistoru a odečítání údajů z měřicích přístrojů. Delší doba měření může také značně oteplít FV článek a tak deformovat VA charakteristiku článku. Největší problém jak už jsem zmínil, je měření proudu na krátko, obr. 2. Na ampérmetru je značný úbytek napětí vzhledem k napětí na prázdnou generovaným článkem. Tento problém způsobí lehké zatížení článku, a tak není možné změřit proud na krátko při nulovém napětí. K získání celé VA charakteristiky je poté nutné dopočítat průsečík s osou, na níž je vynášen proud, v obrázku č. 1 je tento průsečík označen jako I_{sc} .



Obrázek 2: Měření fotovoltaických článků

3 Silová část

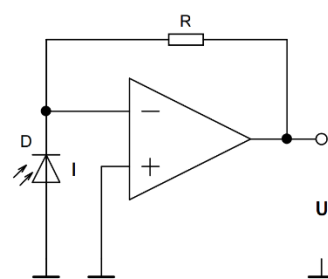
V této kapitole si popíšeme řešení silové části, které bylo uveřejněno v [1]. Měřicí obvod vychází z konstrukce převodníku proud na napětí s operačním zesilovačem viz obrázek č.3. V obvodu převodníku je vytvořena záporná zpětná vazba z výstupu na invertující vstup přes rezistor R. Operační zesilovač se snaží udržet vlivem zpětné vazby nulové napětí mezi invertujícím a neinvertujícím vstupem, vlivem tohoto děje vzniká v obvodu virtuální nula (na obrázku č.3 je to uzel, kam je připojena katoda fotodiody, zpětnovazební rezistor R a invertující vstup) a fotodioda tak pracuje v režimu na krátko. V ideálním případě je pak výstupní napětí rovno

$$U = R * I \quad (1)$$

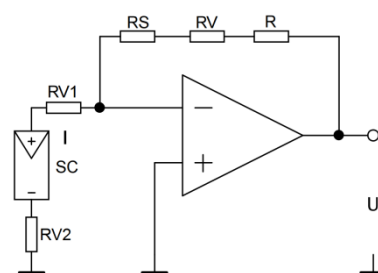
Při připojení FV článku by takto šel změřit proud na krátko, pokud by operační zesilovač poskytl výstupní proud v řádu jednotek ampér. Při průchodu velkých proudů se již začne projevovat úbytek napětí na vodičích RV₁ a RV₂, kterými je připojen článek do obvodu a nedojde tak k dosažení bodu, kdy teče proud na krátko a napětí na článku je nulové.

Proto byl vyvinut obvod, který eliminuje vliv propojovacích vodičů a přechodových odporů. Měřený FV článek je v tomto případě připojen k měřicímu obvodu čtyř-svorkově viz obrázek č.5. Dále je do obvodu připojen pomocný zdroj U, pomocí kterého je možné nastavit napěťový posun "virtuální nuly". Obvod se snaží udržet nulové napětí mezi invertujícím a neinvertujícím vstupem. Při nulovém napětí pomocného zdroje U se měří proud na krátko FV článku, při postupném zvyšování napětí U roste i napětí na FV článku a díky tomu je možné proměřit celou VA charakteristiku FV článku.

Pomocný zdroj napětí U byl nahrazen programově říditelným zdrojem napětí, který je tvořen DA převodníkem. Díky tomu je možné automatizovat celý proces měření VA charakteristik FV článku. Dále byl přidán AD převodník, který snímá výstupní napětí z Halova senzoru, který je použit pro měření proudu.



Obrázek 3: Převodník proudu na napětí s operačním zesilovačem [1]



Obrázek 4: Převodník proudu na napětí s operačním zesilovačem a parazitními odpory [1]

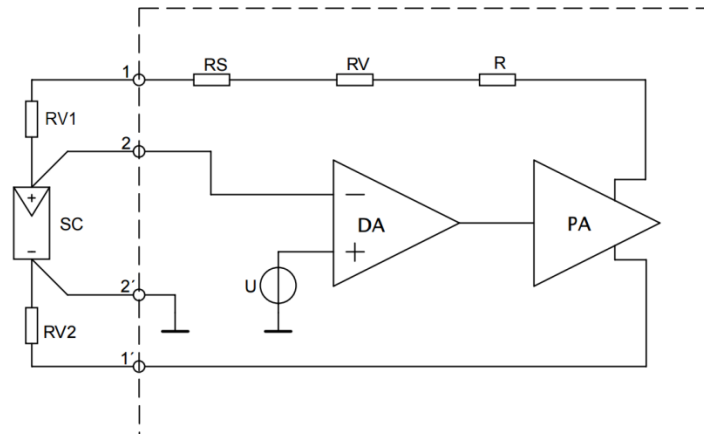
Na obr. 5 je znázorněno čtyř vodičové zapojení, které kompenzuje odpory RV_1, RV_2 (Odpor přívodních vodičů, kterými je připojen měřený článek), RS (odpor připojovacích konektorů), RV (vnitřní odpor obvodu) a R (zpětnovazební odpor)

DA – Rozdílový operační zesilovač (differential amplifier)

PA – Silový zesilovač (power amplifier)

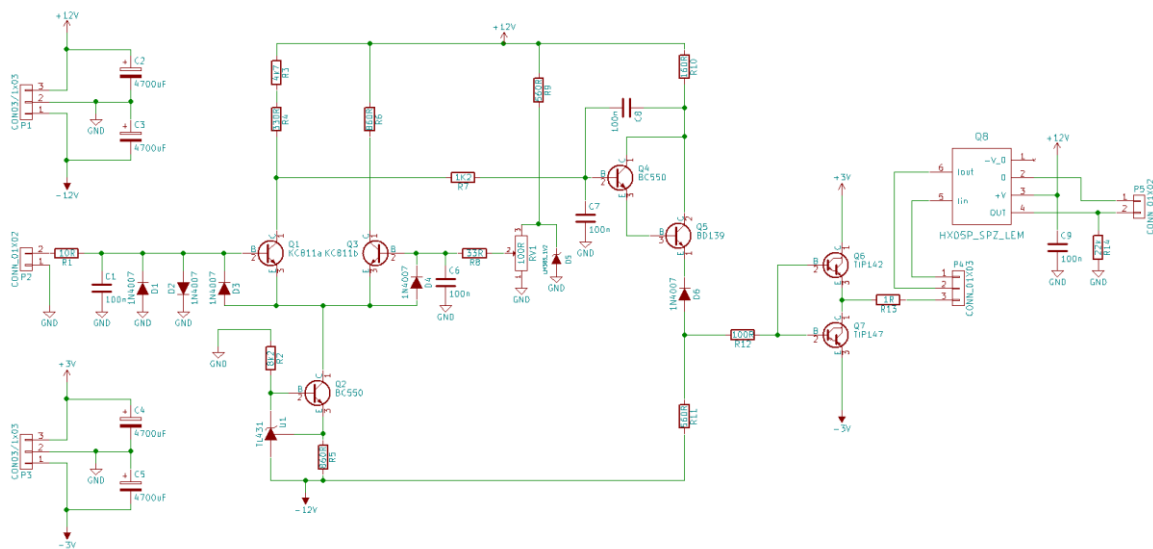
SC – Solární článok (solar cell)

U – Stejnsměrný řiditelný zdroj pro nastavení zatížení



Obrázek 5: Čtyř vodičové zapojení OZ [1]

3.1 Schéma



Obrázek 6: Schéma silové části - upraveno z [1]

3.2 Popis řešení

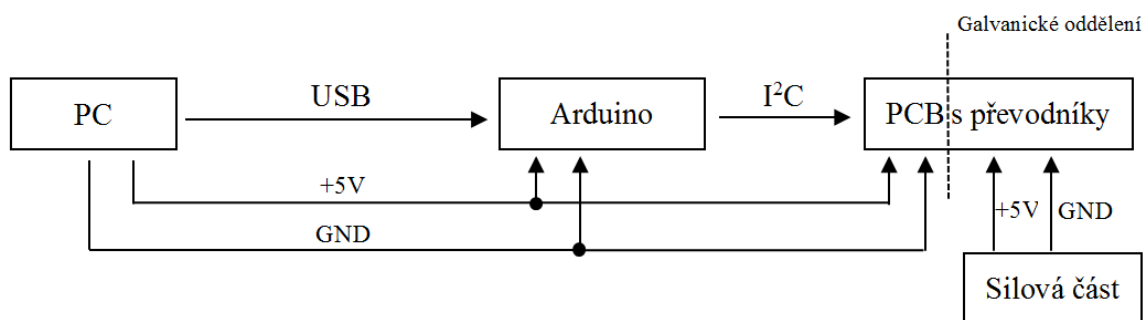
Na obr. 6 je znázorněno finální řešení silové části. Jako rozdílový operační zesilovač je použita součástka KC811, která se skládá z dvou tranzistorů NPN. Místo potenciometru RV_1 je použit výstup

z D/A převodníku jako zdroj napětí. Pro měření proudu je zde použita Hallova sonda typu HX05P s rozsahem proudů 0-5 A. Odpor R11 reprezentuje zpětnovazební odpor.

4 Slaboproudá část – A/D, D/A

4.1 Návrh

První věc, nad kterou bylo potřeba se zamyslet, bylo propojení výkonové části s PC. Bylo potřeba zpracovat signály a posílat je do PC. Jako prostředníka jsem zvolil elektronickou platformu Arduino, která mimo jiné disponuje převodníky analogového signálu do digitálního. Nicméně přesnost 10 bitového převodníku při referenčním napětí 5V je pouze 4,89mV na dílek, proto jsem zvolil 12 bitové převodníky. Dalším důvod proč nelze využít integrované převodníky, je požadované galvanické oddělení převodníků od mikroprocesorové části. Proto bylo namísto navrhnout slaboproudou mezi část, která by obsahovala přesnější převodníky a galvanické oddělení. Arduino má v základu integrovanou I²C sběrnici po které je možné pohodlně posílat data z externích převodníků. Právě na této sběrnici bylo umístěno galvanické oddělení, jak je vidět na obrázku č. 7 [16].



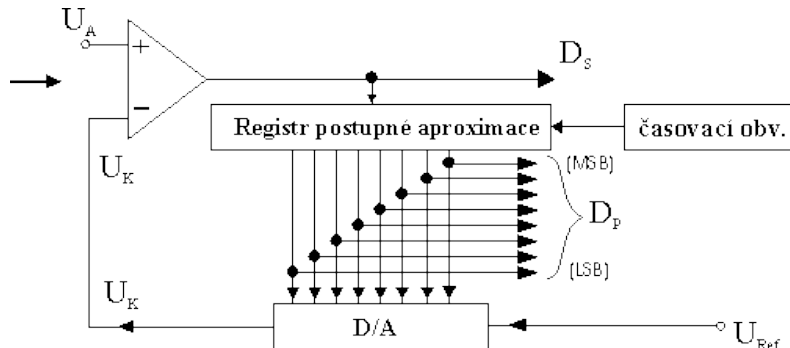
Obrázek 7: Komunikace

4.2 A/D a D/A převodníky

4.2.1 Princip

Analogově číslicové převodníky a digitálně analogové převodníky jsou elektronické součástky, které nám umožňují převod spojitého neboli analogového signálu do nespojitého neboli digitálního. Umožní nám převést napětí do digitální podoby a přečíst jej na počítači. Existuje spousta typů, např. komparační, kompenzační, nebo integrační [3]. V slaboproudé části byly použity převodníky s postupnou aproximací. Jejich princip je založen na postupném dělení referenčního napětí, dokud se neshoduje s měřeným napětím. Jako první aproximační převodník nastaví poslední (nejvyšší) bit na 1, tedy D/A jednotka propustí poloviční referenční napětí. Komparátor vyhodnotí,

jestli napětí z D/A jednotky je větší nebo menší. Dle výsledku pošle registru 1 v případě, že měřené napětí je menší než z D/A jednotky a v opačném případě 0. Podle hodnoty z komparátoru registr řekne D/A jednotce, aby napětí o polovinu zvětšil či zmenšil. Takto postupuje aproximační registr podle výsledku komparátoru, dokud se napětí referenční nerovná měřenému.



Obrázek 8: Převodník s postupnou aproximací[4]

4.2.2 Požadavky

Požadavky na převodníky jsou 3 základní, dle kterých jsem vybíral.

- cena
- přesnost
- způsob komunikace

Základní vlastnost, která mě zajímala, je způsob spojení s Arduinem. Jak jsem již psal, Arduino má implementovanou I²C sběrnici. Vybíral jsem tedy převodníky s komunikací po sběrnici I²C. Druhým faktorem je přesnost převodníku, kterou určuje referenční napětí a počet bitů převodníku. Základní převodník má 10 bitů, tedy 1024 hodnot na stupnici 0 až 5 V. V tomto provedení máme LSB neboli bit s nejnižší hodnotou 4,88 mV na krok. Vzhledem k nárokům na přesnost jsem hledal 12 bitové převodníky a přesnější. Při 12 bitech máme LSB 1,22 mV. V poslední řadě jsem vybíral v rozumné cenové relaci.

4.2.3 Konkrétně vybrané typy

Za vhodné jsem shledal převodníky **MCP4725** [18] a **MCP3221** [17] od společnosti Microchip. Na desce jsou osazeny po dvojicích, vždy s odlišnou adresou. Oba dva typy jsou 12 bitové s komunikací přes I²C. Jejich cena se pohybuje v řádů desítek korun. Převodníky jsou připojeny přes číslicový izolátor ADUM1250 [20], je tedy zajištěna bezpečnost Arduina.

4.3 Výroba plošných spojů

Při tvorbě vlastního plošného spoje je dobré se zamyslet nad volbou použitého softwaru, který pro nás bude vhodný. Je dostupné velké množství programů, které jsou zaměřené na návrh plošného spoje. Profesionální software je velmi drahý, v řádu desítek tisíc korun, až po stovky tisíc v případě programu Mentor Graphics, ale jsou tu i takové, které jsou k dispozici zdarma, nebo za nízký poplatek. Mezi ně patří i KiCad, který jsem využil právě já. Když víme, co chceme sestavit a máme i vhodný program, můžeme se pustit do tvorby našeho požadovaného schématu.

4.3.1 KiCad

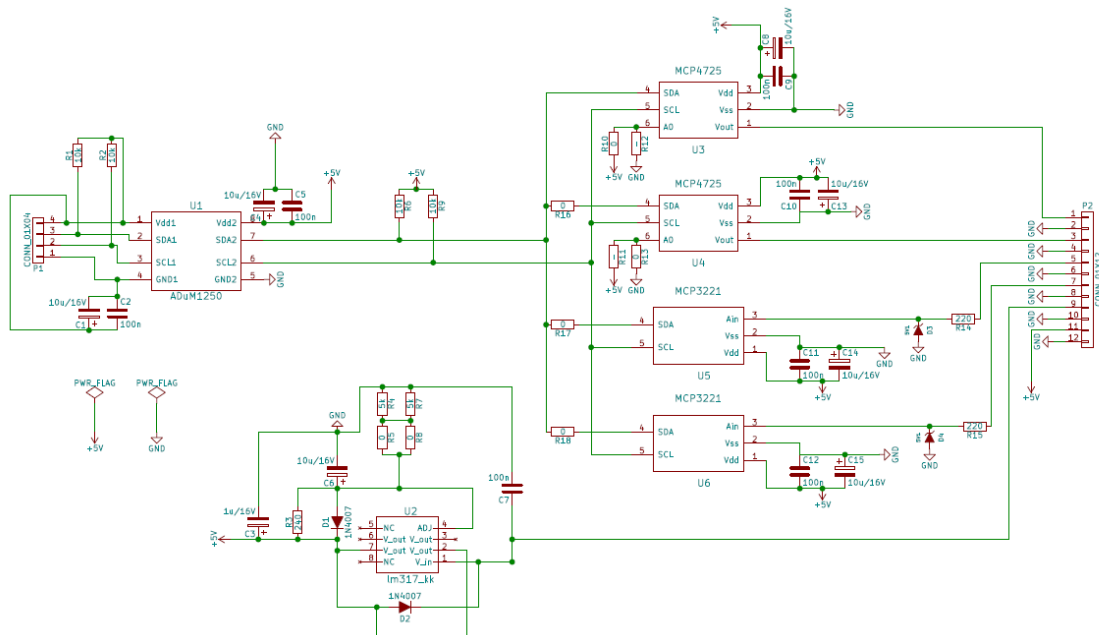
Program KiCad slouží k návrhu a realizaci desky plošných spojů. KiCad lze stáhnout s tzv. GNU General Public License (GPL) verze 3 [5], takže je možné ho bezplatně stáhnout a používat všechny jeho části. Je možné v něm vytvářet vlastní knihovny a další modifikace. Pomocí externích nástrojů můžeme své návrhy importovat do jiného programu a opačně. Program také umožňuje 3D zobrazení navržené desky. Byl vybrán, protože jeho licence umožňuje využití pro nekomerční účely, a je tak vhodný pro uživatele, kteří tvoří desky pro svoje projekty. Většinou jednoduché návrhy, maximálně o dvou vrstvách. Nicméně KiCad podporuje desky plošných spojů až o šestnácti vrstvách a je schopen generovat data (podklady) pro výrobce DPS (gerber data). Umožňuje tedy profesionální návrh průmyslové plošné desky [6].

4.3.2 Schéma

V první řadě je potřeba vytvořit schéma zapojení. Do prázdného pole nahrajeme veškeré potřebné součástky, které budeme potřebovat. V případě potřeby je můžeme i dodatečně kdykoliv přidat nebo odebrat. Rozmístíme hlavní IO tak, jak uznáme za vhodné, pokud možno, co nejpřehledněji. 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. Ověřit správné zapojení nám pomůže ikonka s názvem “electrical rules check“, která nám oznámí, zda jsou všechny vývody připojeny, případně další chyby. Všechny součástky musíme očíslovat a nejlépe jim i přiřadit požadovnou hodnotu. Dále musíme vybrat pro každou součástku pouzdro, ve kterém bude osazena. Nakonec vygenerujeme netlist, který nese veškeré důležité informace o schématu.

Na desce jsou 4 převodníky, 2 pro nastavení napětí a 2 pro sběr dat. Dále je tu i číslíkový obvod ADUM1250, který provádí galvanické oddělení sběrnice. Toto nám zajistí bezpečnost Arduina desky v případě poruchy výkonové části, umožní připojení převodníků jiným potenciálem a také zamezí vzniku zemních smyček, viz obr. 7. Napájení je možné realizovat pomocí přímého napojení 5 V nebo použít integrovaný stabilizátor napětí LM317, který je chráněn diodou D₂ před zničením

zpětným proudem. Stabilizátor lze napájet 7-37 V a jeho výstupní napětí lze nastavit pomocí napěťového děliče, viz rovnice (2). V našem případě by napětí mělo být v rozsahu tolerance převodníku a to 2,7-5,5 V.



Obrázek 9: Schéma DAQ systému

P2			
číslo	označení	Hodnota	význam
1	AOUT1	0-5 V / < 25 mA	Analogový výstup 1
2	GND	0V	Zem
3	AOUT2	0-5 V / < 25 mA	Analogový výstup 2
4	GND	0 V	Zem
5	AIN1	0-5 V	Analogový vstup 1
6	GND	0 V	Zem
7	AIN2	0-5 V	Analogový vstup 2
8	GND	0 V	Zem
9	12V	Cca 7-37 V	Napájení in
10	GND	0 V	Zem
11	5V	5 V	Napájení in/out
12	GND	0 V	Zem

Tabulka 1: Piny strana Silová část

P1			
číslo	označení	hodnota	význam
1	GND	0 V	zem
2	SCL	0/5 V	Arduino clock
3	SDA	0/5 V	Arduino data
4	VCC	5 V	Napájení

Tabulka 2: Piny strana Arduino

Pokud je připojené napájení na pin 9(12V) lze využít pin 11(5V) jako zdroj napětí 5 V (<100mA). Veškeré hodnoty součástek jsou zaznamenány ve schématu. Pouze odpory R4,R5 a R7,R8 jsou naznačeny a jejich hodnota musí být spočítána na požadované napětí, které má LM317 dodávat. Požadované napětí lze vypočíst z tohoto vztahu uvedeném v [19].

$$V_{out} = 1,25 * \left(1 + \frac{R3}{Rx}\right) + I_{ADJ} * R3 \quad (2)$$

Tedy:

$$Rx = R3 * \frac{1,25}{V_{out} - I_{ADJ} * R3 - 1,25} \quad (3)$$

$$R3 = 240 \Omega$$

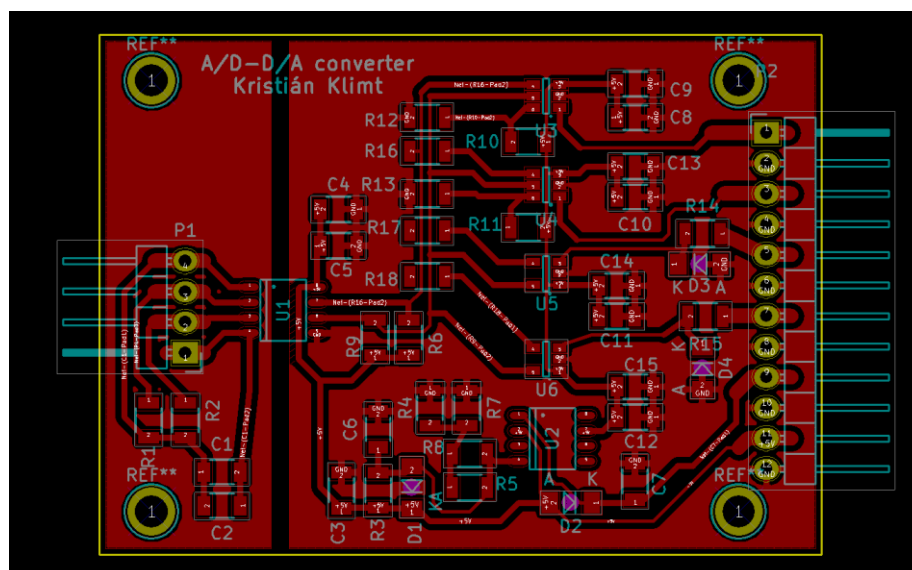
I_{ADJ} je obvykle kolem 100 μ A, přesná hodnota je uvedena v Datasheetu.

Rx je kombinace odporů R4,R5,R7 a R8. Tyto odpory nemusejí být osazeny všechny. Jsou tu pouze pro přesnější nastavení požadovaného napětí. Pro napětí 5 V vychází odpor 80,5 Ω . Tento odpor může být reprezentován sérioparalelní kombinací odporů R4 = 160 Ω , R5 = 1 Ω , R7 = 160 Ω a R8 = 1 Ω .

4.3.3 Návrh samotné desky

Po otevření editoru na tvorbu plošného spoje otevřeme netlist vygenerovaný ze schématu. Do editoru se nám nahrají veškeré součástky a jejich propojení. Program nám všechny součástky vygeneruje na jedno místo, je tedy potřeba je rozmístit. Je dobré si předem rozmyslet, jak chceme, aby naše deska vypadala, ale zároveň musíme dbát na pravidla tvorby plošných spojů. Tvorba desky není nijak jednoduchá, už jen proto, že na rozdíl od schématu se nám nesmějí žádné cesty křížit. Po hrubém rozmístění pomocí nástrojů ohraničíme součástky, a tak dáme desce konečné rozměry. Editor nám ukáže, jaké součástky je potřeba spojit. V daném místě zvolíme vyhovující tloušťku spoje. Pravidlem bývá dělat tyto spoje co nejtlustší. Na konec můžeme přidat montážní díry pro snadné upevnění desky

v případě, že to bude potřeba. Hotovou desku lze vygenerovat v různých formátech, dle technologie, kterou použijeme na zhotovení desky.



Obrázek 10: Deska plošného spoje DAQ systému

4.3.4 Zhotovení a osazení desky

Zhotovení desky je možné různými způsoby. My jsme pro zhotovení první desky zvolili jednoduchý způsob, pomocí frézky, která nám v cuprextitu vyfrézovala požadované cesty. Osazení součástek jsme provedli ručně. Tato deska slouží pouze na testování. V případě potřeby je možné desku nechat udělat u specializované firmy, které se tímto zabývá. Osazenou desku lze najít pod přílohou č. 3.

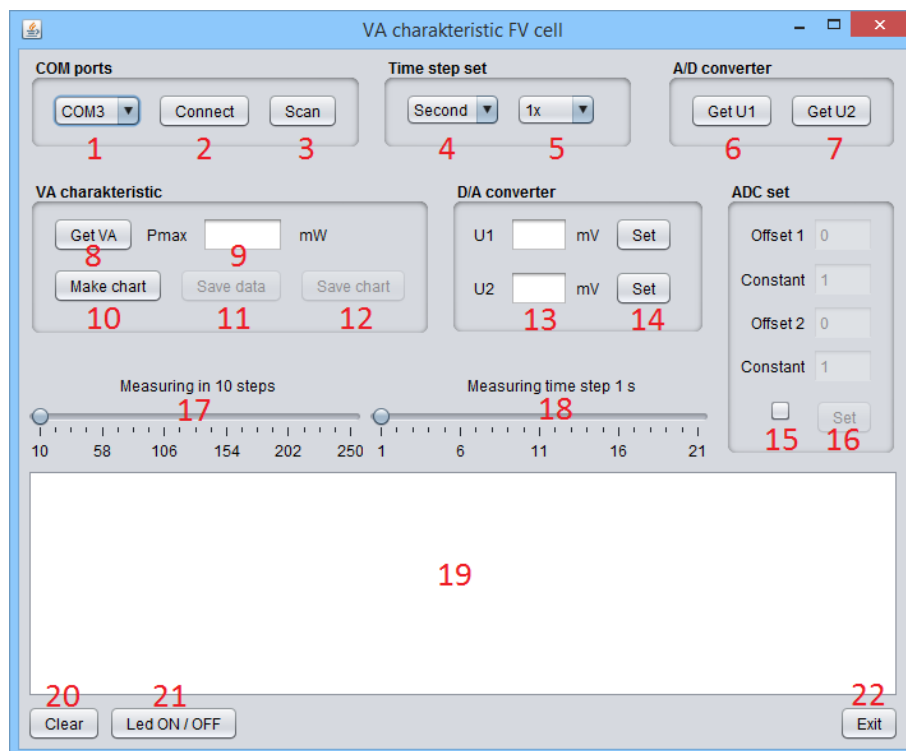
5 Uživatelské prostředí - strana PC

5.1 Návrh

Základní myšlenka byla ve snadném ovládní převodníků a jednoduchém získání voltampérové charakteristiky. Nicméně postupem času byla potřeba nastavovat další a další specifikace tak, abychom mohli dosahovat přesných výsledků, ale i univerzálnosti. Jako programovací jazyk byla zvolena Java, především pro lehké implementování grafického rozhraní. Finální podobu uživatelského rozhraní na straně PC můžeme vidět na obr. 8. Prvním krokem pro správnou funkci je připojení Arduina pomocí tlačítka Connect. Pokud by program nenabízel COM port, na kterém je Arduino připojeno, můžeme pomocí tlačítka Scan znovu prohlédnout, zda nějaký port nepřibyl. Je tedy možné bez problému připojovat a odpojovat platformy bez nutnosti resetování programu. Pokud nebude zařízení připojeno, tak nám všechny ostatní tlačítka sdělí, že není možné provést akci v důsledku nepřipojeného zařízení. Správné připojení nám napíše „Connect successful“ a tlačítka connect se

změní na disconnect, zároveň se nám uzamkne tlačítko Scan a box s COM porty. Jestliže chceme ověřit spojení mezi PC a Arduinem, můžeme využít tlačítko led ON / OFF, které nám rozsvítí či zhasne vestavěnou led diodu na elektronické platformě.

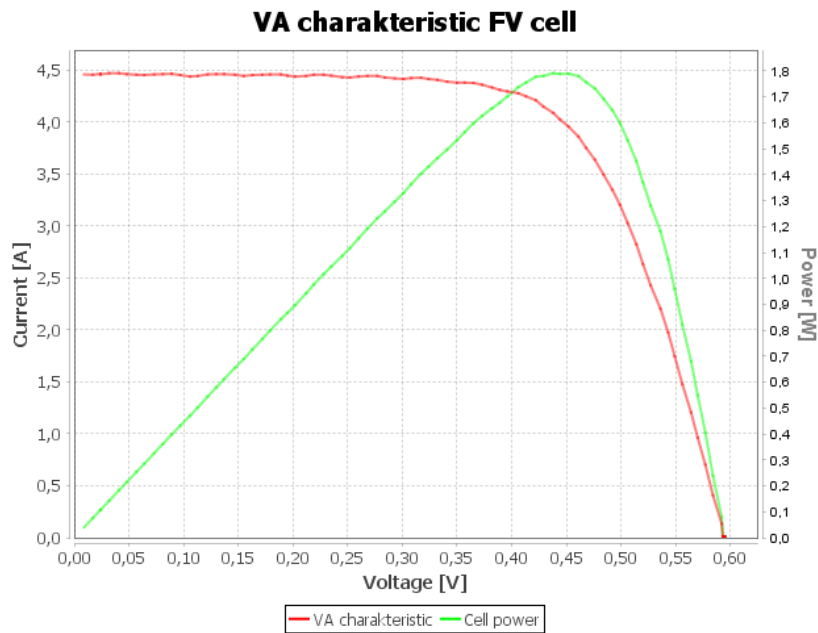
Panel s názvem „Time step set“ má 2 tlačítka, která nám umožní nastavení časového rozmezí mezi jednotlivými měřeními. Lze zde vybrat mezi sekundami, minutami nebo hodinami. Pro přesné nastavení času mezi kroky měření využijeme posuvník s číslem 18. Hned vedle se nachází oddělení s názvem „A/D converter“, také se dvěma tlačítky. Pomocí nich lze zjistit, jaké je napětí na jednom nebo druhém převodníku. Pokud bychom chtěli napětí nastavit, využijeme panel s názvem „D/A converter“. Napětí lze nastavovat od 0 do 5 V. Nejdůležitější část programu je oddělení „VA characteristic“, kde se nachází tlačítko „Get VA“, pomocí kterého změříme charakteristiku solárního článku. Pokud budou všechna data získána, otevře se nám možnost tyto data uložit. Pomocí dat lze vykreslit graf pod tlačítkem „Make chart“ a zároveň jej poté uložit. Program nám také vypíše maximální výkon, kterého dosáhl panel během měření. Tento údaj je získán postupným násobením příslušného proudu a napětí, kdy nám zobrazí nejvyšší dosažené hodnoty. V poslední řadě lze k A/D převodníkům nastavit i offset a konstantu pro korigování vstupních dat. Pro povolení tlačítka v sekci ADC set musíme zaškrtnout check box pod číslem 15. Tlačítko „Clear“ nám v případě potřeby vymaže veškerý text napsaný v textovém poli.



Obrázek 11: UI PC programu

Popis ovládání:

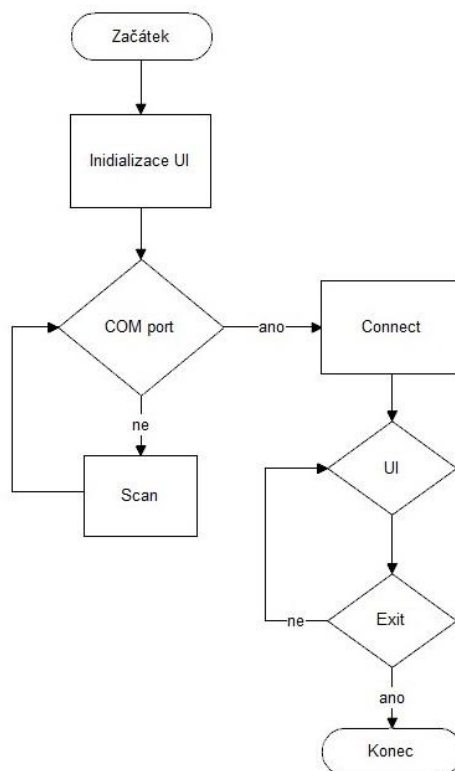
1. Výběr sériového portu
2. Připojení / odpojení portu
3. Skenování portů k dispozici
4. Volba časového rozmezí mezi jednotlivými kroky
5. Volba násobku časového rozmezí mezi jednotlivými kroky
6. Získání napětí na A/D převodníku 1
7. Získání napětí na A/D převodníku 2
8. Získání VA charakteristiky FV článku
9. Zobrazení maximálního výkonu měřeného článku
10. zobrazit graf naměřené charakteristiky
11. Uložení dat
12. Uložení grafu
13. Pole pro zápis hodnoty napětí
14. Zápis požadovaného napětí, které chceme zapsat na D/A převodník
15. Povolení zápisu nastavení A/D převodníku
16. Zápis přesného nastavení převodníků
17. Nastavení počtu kroků
18. Nastavení času mezi kroky
19. Konzole na výpis informací
20. Vymaže text konzole
21. Zapíná a vypíná led na desce Arduino
22. Vypne program



Obrázek 12: Graf vytvořený programem

Takto vypadá graf, který nám program vygeneruje. Červené křivka znázorňuje voltampérovou charakteristiku měřeného článku. Zelené udává výkonovou závislost. Tento graf odpovídá polykrystalickému článku měřenému na 100 kroků s časovým odstupem 10ms. Program spočítal maximální výkon článku na 1,79 W.

5.2 Blokový diagram



Obrázek 13: Vývojový diagram PC programu

Na diagramu je znázorněn pouze základní průběh navázání spojení potřebný pro komunikaci s Arduinem. Po navázání spojení lze posílat požadavky.

Software není potřeba instalovat, stačí pouze spustit exe soubor. Podporovány jsou všechny běžné operační systémy, jako Windows, Linux nebo Mac OS. Pro správnou funkčnost je potřeba, aby daná platforma měla nainstalováno JRE (Java Runtime Environment). Program je otestován na Java SE Runtime Environment 8, pro starší verze netestováno. Vše potřebné naleznete na stránce www.oracle.com, přímý odkaz na JRE zde [7].

6 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 takřka 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 váš projekt [8].

6.1 Arduino Uno

Tento typ Arduina je asi nejrozšířenější platformou. Má čip ATmega328P osazený do patice, a tak je možné čip vyjmout či vyměnit v případě zničení. Disponuje napájecím blokem, který usměrňuje napětí na operační napětí 5 V. Je tedy možné desku napájet větším rozsahem napětí. Dalším blokem je rozhraní USB, které umožňuje přenos programu do čipu. Hlavní přednost Arduina je série analogových a digitálních vstupů/výstupů, které umožňují připojit či řídit různé senzory nebo jiná zařízení. Analogové vstupy jsou řešené pomocí 10bit A/D převodníku. Je tedy možné číst 0 až 1023 hodnot na rozsahu 0 až 5 V. Analogový blok je pouze na čtení signálu, nelze jej použít jako výstup, tedy Arduino neobsahuje D/A převodníky. Digitální vstupy naopak lze využít jako výstupy. Logika digitálních vstupů/výstupů je realizována pomocí 1 a 0, kdy 0 je reprezentována napětím 0 V, tedy LOW. Logická hodnota 1 je reprezentována napětím 5 V, tedy HIGH. Důležitou součástí Arduina jsou piny A4 a A5 neboli SDA a SCL. Na tyto piny je připojena sběrnice I²C [9].

Technické specifikace:

Mikrokontroler	ATmega328P
Operační napětí	5V
Vstupní napětí (doporučené)	7-12V
Vstupní napětí (limit)	6-20V
Digitální I/O Piny	14
PWM Digitální I/O Piny	6
Analogové vstupní Piny	6
DC proud na I/O Pin	20 mA
DC proud na 3.3V Pin	50 mA
Flash paměť	32 KB (ATmega328P) z toho 0.5 KB využívá bootloader
SRAM	2 KB (ATmega328P)
EEPROM	1 KB (ATmega328P)
Rychlost hodin	16 MHz
Délka	68.6 mm
Šířka	53.4 mm
Hmotnost	25 g

Tabulka 3: Specifikace Arduino Uno [9]

Pro potřebný software bohatě postačí základní verze Arduina a to Arduino Uno. S touto verzí se dobře pracuje a je vhodná k testování. Program lze nahrát do jakékoli Arduino desky, jen u verzí „Pro Mini“ a „Mini“ je potřeba mít USB převodník na přednos programu do čipu.

6.2 Software

6.2.1 IDE

Programovací prostředí Arduina je velmi jednoduché. Na začátku je potřeba pouze vybrat naši zvolenou desku a port, ke kterému je připojena. Dále nás už jen zajímají 5 ikoněk. Verify, Upload, New, Open a Save.



Verify:

Slouží na ověření správné syntaxe našeho programu.

Upload:

Pomocí této ikonky nahrajeme program do našeho Arduina.

New:

Otevře nové okno pro nový program.

Open:

Zde můžeme otevřít nějaký program z minulosti.

Save:

Umožní uložit postup při psaní programu.



Obrázek 14: Arduino IDE

6.2.2 Programovací jazyk

Programování Arduina je založené na jazyku C a C++. Nejjednodušší je použít knihovnu jazyka C++ nazvanou Wiring. Knihovna je tak rozsáhle používána, že se většinou mluví o Wiringu jako o samotném programovacím jazyku. Arduino IDE má tuto knihovnu implementovanou a je založené na jejím použití. Při otevření IDE se nám otevře nový projekt se základním kódem, který je vidět na obrázku. IDE nám vytvoří základní 2 bloky void setup() a void loop(), tyto 2 bloky musí program vždy obsahovat i kdyby měly být prázdné, jinak by nám IDE vyhodilo chybnou hlášku při kompilaci. [8]

```
1 void setup() {
2   // put your setup code here, to run once:
3
4 }
5
6 void loop() {
7   // put your main code here, to run repeatedly:
8
9 }
```

void setup() se spustí pouze jednou a to při nahrání programu do Arduina, přivedení napájení nebo stisknutí tlačítka restart. Do tohoto bloku obvykle nahráváme různá nastavení pinů a zařízení.

void loop() je smyčka, která se opakuje do nekonečna, dokud neodpojíme napájení, nenahrajeme do Arduino nový program nebo nezmáčkneme tlačítko restart. Do této smyčky píšeme hlavní logiku celého našeho programu.

komentáře se píše pomocí dvojitého lomítka, jak je vidět na obrázku. Komentáře slouží k popsání různých částí kódu tak, abychom zpětně nemuseli zjišťovat, jakou funkci plní daný kód. Při kompilaci se neberou komentáře v potaz a vůbec se nenahrávají do Arduina, jsou tedy opravdu jen pro přehlednost.

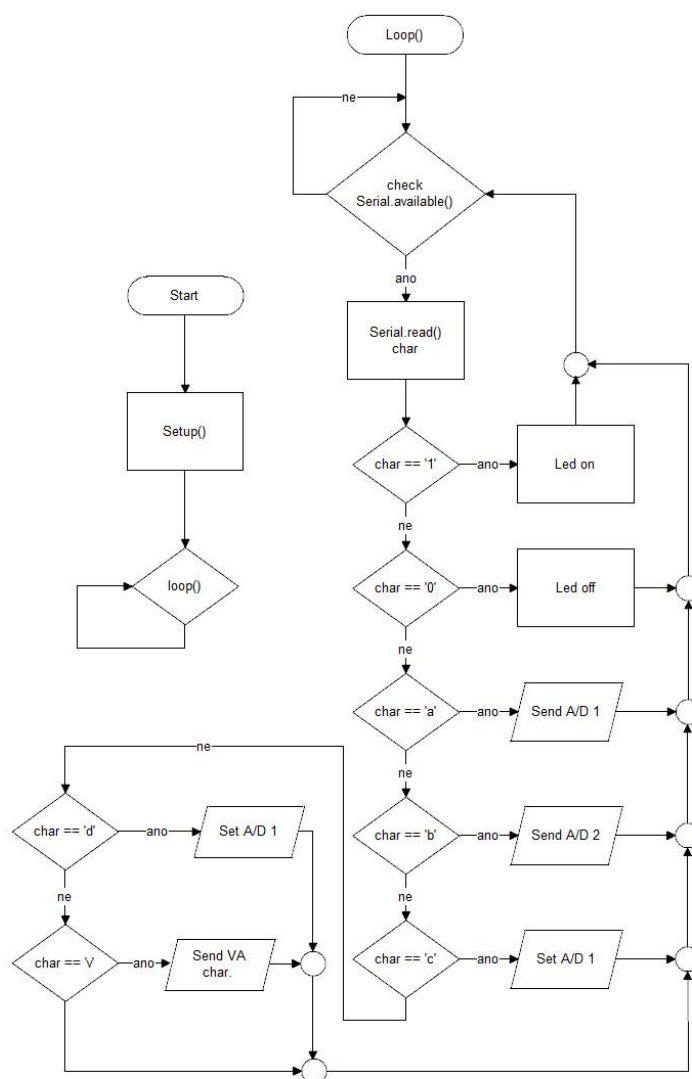
6.2.3 Vlastní program

Po zapnutí Arduina se první spustí funkce `setup()`, kde se nám inicializuje sériová komunikace a nastaví `pinMod` pro testovací diodu. Následuje funkce `loop()`, která běží stále dokola, dokud nedojde k odpojení Arduina od zdroje napětí. V našem případě je zdroj napětí USB kabel. V této funkci je hlavní podmínka `if`, která dokola hlídá, zda nepřicházejí nějaká data po sériové lince z PC. Pokud přijdou data, vezme první znak a podívá se, jestli tento znak je mezi námi zvolenými. Podle typu znaku program postupuje danou cestou. Arduino akceptuje 7 znaků a to `'1'`, `'0'`, `'a'`, `'b'`, `'c'`, `'d'` a `'v'`. Když přijde znak `'1'`, Arduino přepne pin 13 na stav 1. Na pinu 13 je vestavěná LED dioda. Tuto diodu lze ovládat pomocí programu z PC. Slouží k ověření komunikace mezi Arduinem a počítačem. Pokud LED dioda svítí a po sériové komunikace přijde znak `'0'`, dioda se zhasne. Znak `'a'` je vyhrazen pro první A/D převodník. Pokud přijde tento znak Arduino vyvolá funkci `readAD1()`. Tato funkce zahájí komunikaci přes I²C, kdy pošle adresu daného převodníku a zpátky dostane odpověď ve formě bitů, které reprezentují napětí na převodníku převedené na číselné rozpětí 0-4095. Nakonec se toto číslo převede na hodnotu napětí a pošle se zpátky po lince do PC. Pro získání hodnoty napětí pro druhý převodník je vyhrazen znak `'b'`. Další pár znaků je vyhrazen pro zápis do D/A převodníků. Jestliže pošleme znak `'c'` nebo `'d'`, Arduino bude očekávat za tímto znakem další znaky reprezentující napětí, které chceme nastavit na daný převodník. Znaky spojí dohromady a převede na číslo, které následně ještě převede z napětí na hodnotu od 0 do 4095. Toto číslo se pošle jako argument funkce `writeDA1`. V této funkci Arduino pošle po sběrnici adresu převodníku, který chceme nastavit, a následně pošle hodnotu, kterou chceme nastavit.

Poslední a nejdůležitější znak je písmeno `'v'`. Pod tímto znakem se skrývá samotné měření voltampérová charakteristiky solárního článku. Pokud chceme charakteristiku získat, musíme kromě znaku `'v'` zaslat počet kroků, na který chceme měřit, ale i čas mezi jednotlivými kroky. Arduino bude očekávat sadu znaků, které si uloží jako String a pomocí speciálního znaku vyčte počet kroků a čas mezi kroky. Když máme potřebné specifikace měření, spustí se for cyklus, ve kterém proběhne měření charakteristik. V prvním kole se nastaví převodníky na napětí 0, a poté program čeká 100ms na ustálení přechodných dějů Hallovy sondy, která slouží na silové části jako převodník proudu na napětí. Pokud nastavíme převodníky na hodnotu napětí 0, pak se chová operační zesilovač v invertujícím

režimu silové části tak, jako by byl zapojen na zem, tedy se snaží vykompenzovat článek, a tím je plně zatížen. Článek generuje maximální proud a ten skokově projde hallovou sondou. Proto zde bylo potřeba setrvat nějaký čas, abychom mohli odečíst z hallové sondy platná data. V dalších cyklech se vždy nastaví o něco větší hodnota napětí na D/A převodníku, a poté se čeká zvolený čas a až poté se odečte napětí a proud článku. Tyto hodnoty se ukládají do dvojice polí, které reprezentují napětí a proud. Po naplnění pole zvoleným počtem hodnot je Arduino odešle po sériové lince do PC, kde se dále zpracovávají. Když jsou vyřízeny veškeré požadavky Arduino znovu čeká, zda se něco neobjeví na sériové lince.

6.3 Blok, diagram

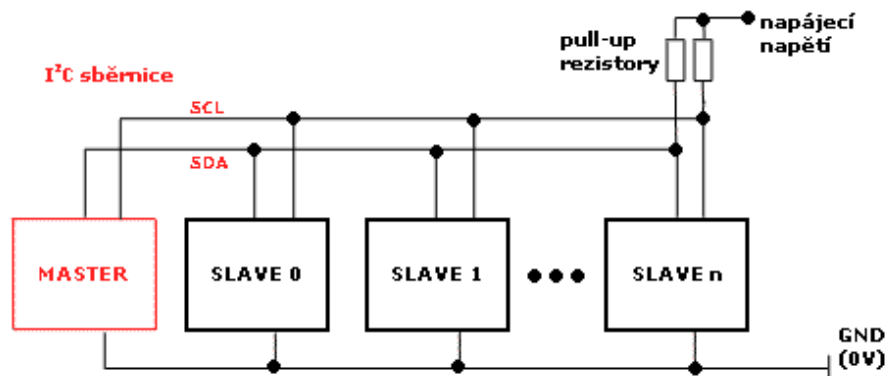


Obrázek 15: Vývojový diagram Arduino

7 Komunikace

7.1 Sběrnice I²C

I²C (Internal-Integrated-Circuit Bus) sběrnici vyvinula firma Philips přibližně před 20 lety. Dodnes se hojně používá ke vzájemné komunikaci různých zařízení. I²C je velmi populární především díky své jednoduchosti. Celá sběrnice potřebuje pouze dva vodiče. První se nazývá SDA (serial data) a druhý SCL (serial clock). Celý princip je založen na jednom zařízení MASTER a pak až 127 různých zařízení nazvaných SLAVE. Každé zařízení má svoji adresu, která je složena ze sedmi bitového čísla. Ve vzácných případech je možné připojit až 1024 zařízení, pak ale musejí být sběrnice deseti bitové. Oba vodiče jsou připojeny přes pull-up rezistory na kladné napájecí napětí, a tak je v klidovém stavu na sběrnici logická jednička. Jednotlivé zařízení jsou připojeny jako otevřený kolektor, za klidového stavu jsou odpojeny, a v případě vysílání připojují nulové napájecí napětí, tedy logickou nulu. Na této sběrnici není možný duplexní přenos, vždy komunikuje pouze jedno zařízení [10].



Obrázek 16: Propojení I2C [10]

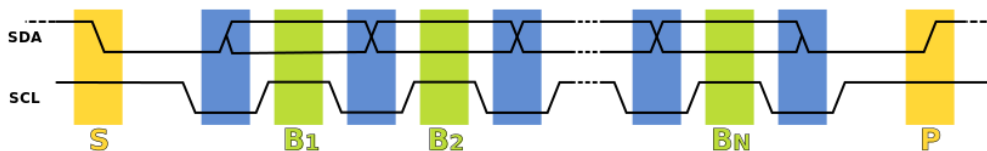
SDA slouží pro přenos adres a dat.

SCL je hodinový signál, který generuje při přenosu MASTER a podle něj SLAVE posílá bity. Rychlost signálu může být od 10 kbps až 3,4 Mbps, typicky to bývá 100 nebo 400 kbps.

Ack bit je tzv. potvrzující bit (acknowledge). Posílá se za adresou či daty.

Průběh komunikace

Komunikace začíná START bitem, kdy jsou oba vodiče v klidovém stavu, tedy nesou logickou 1 a vodič SDA se přepne na logickou 0. MASTER ví, že začíná přenos a začne generovat hodinový signál. Jakmile začne generování signálu, v první řadě pošle SLAVE svoji adresu. Poté MASTER pošle Ack bit, aby SLAVE věděl, že obdržel kompletní adresu. Dále se posílají data, dokud se nepošle Ack bit, který oznámí konec dat. V poslední řadě následuje STOP bit, který nastane, pokud je na SCL i SDA logická 1 zároveň. Tím se celý přenos ukončí.



Obrázek 17: Přenos I2C [11]

Arduino komunikuje pomocí I²C s převodníky umístěnými na slaboproudé desce. Jak víme, obsahuje dva převodníky, které převádějí analogový signál na digitální a dva, které převádějí digitální na analogový. Převodník nikdy nezačne komunikovat jako první, pouze čeká pokud master zařízení nevyšle žádost. Komunikace může mít 2 rozdílné průběhy, záleží, jestli chceme číst napětí nebo jej nastavit. V případě čtení dat z převodníku Arduino zahájí komunikaci start bitem a následně pošle adresu převodníku, který chce číst doplněnou o R/W bit. Tento připojený bit určuje, zda chceme data číst či zapisovat. Zařízení slave tak ví, zda má čekat na další data nebo poslat zpátky svoje. Pokud jde o čtení, tak po přijetí adresy a R bitu pošle Ack bit, aby master věděl, že požadované zařízení slave bude odesílat data. Master čte příchozí data dokud slave nezašle ukončovací Ack bit. Druhá varianta nastane, pokud chceme data do převodníku zapsat a tím nastavit jeho výstupní napětí. První část přenosu bude stejná, jako v první variantě. Master začne komunikaci a poté odešle adresu převodníku obohacenou o R/W bit. V tomto případě bude tento bit říkat, že budeme zapisovat. Proto zařízení slave odešle potvrzující Ack bit a bude očekávat data. Nakonec master pošle ukončovací bit a tím komunikace končí [10] [11].

7.2 Sběrnice USB

USB neboli Universal Serial Bus je nejznámější a nejrozšířenější sběrnice dnešní doby. Lze pomocí ní propojit až 127 zařízení. Na sběrnici je vždy jen jedno zařízení typu master a zbylé jsou typu slave. Hlavní struktura propojení je založena na principu větvení pomocí USB hubů, které rozvětvují porty na další a další. Takový rozbočovač má vždy jeden konektor určený pro přímé připojení do PC nebo jiného hubu a dále libovolný počet konektorů k připojení koncových zařízení. Díky této konstrukci je vždy zachováno správné větvení a nedojde tak k zapojení do cyklu. Fyzická vrstva sběrnice je tvořena čtyřmi vodiči, dva jsou použity pro napájení označené jako V_{BUS} a GND. Zbylé dva vodiče jsou tvořeny kroucenou dvoulinkou (twisted pair) a označeny jako D- a D+. Pro kódování bitů se zde použila metoda NRZI, díky které není potřeba po jedné lince posílat hodinový signál. Zařízení se tedy synchronizuje samo pomocí přenášených dat. Sběrnice umí komunikovat dvěma rychlostmi, koncové zařízení si samo řekne, jakou rychlostí chce komunikovat a to tak, že při připojení k PC na jedné z linek D+ nebo D- připojí pull-up rezistor, který na lince zvedne napětí, a tak určí komunikační rychlost [12][13].



Obrázek 18: USB logo[12]

Komunikace mezi PC a Arduinem probíhá pomocí USB. Arduino Uno má vestavěný převodník, který převádí linku RS-232 na USB 2.0. Software je nutný nahrát do čipu Atmega328P pomocí kterého můžeme ovládat veškeré analogové i digitální výstupy a vstupy. Tento čip komunikuje pomocí vodičů Rx a Tx, proto je na desce umístěn i čip Atmega16U2, který na USB portu vytvoří virtuální COM port. Pomocí digitálních výstupů jsou zde připojeny i dvě led diody označeny jako Rx a Tx, které blikají při příchozí či odchozí komunikaci. Přenosová rychlost je nastavena na 9600 baudů, tedy jedna bit se přenesení za 1/9600 s. [14].

Popis paketů:

Příkaz	Popis	Odpověď	poznámka
1	Zapne led diodu na platformě Arduino	-	-
0	Vypne led diodu na platformě Arduino	-	-
a	Požádá o napětí na převodníku 1	x	x je hodnota od 0 do 5000
b	Požádá o napětí na převodníku 1	x	x je hodnota od 0 do 5000
cx	Nastaví převodník 1 na požadovanou hodnotu x	-	x je hodnota od 0 do 5000
dx	Nastaví převodník 2 na požadovanou hodnotu x	-	x je hodnota od 0 do 5000
vx#y	zažádá o data VA charakteristiky	wz	x je hodnota od 0 do 250, y od 10 do 756,000,000

Tabulka 4: Popis paketů

Doplňující poznámky:

Písmena 'wz' jsou po sobě jdoucí hodnoty VA charakteristiky. Napětí zde symbolizuje písmeno 'w' a proud písmeno 'z'. Velikost těchto hodnot závisí na zvolené konstantě a offsetu.

Sériová komunikace používá pro komunikaci znaky v ASCII tabulce. Pokud pošleme znak 'a', pošle se číslo 97 binárně jako 01100001.

V případě, že chceme zjistit napětí na převodníku 1 nebo 2, pošleme znak 'a' nebo 'b' a Arduino nám zpátky pošle velikost daného napětí.

Pokud chceme nastavit převodník, pošleme paket v podobě 'cx', kdy znak 'c' určí převodník a hodnota 'x' nastaví hodnotu napětí.

Poslední a nejsložitější paket, který se odesílá, je v případě požadavku na hodnoty voltampérové charakteristiky. Zde se zasílá řetězec podoby 'vx#y', kde znak 'v' určuje požadavek VA charakteristiky. Následující hodnota 'x' říká počet kroků, na které se bude měřit a poslední hodnota 'y' oddělené znakem '#' řekne čas mezi jednotlivými kroky.

8 Testování

8.1 Testování slaboproudé části

Testování analog/digitálních převodníků proběhlo způsobem postupného zvyšování napětí a odečítání hodnoty naměřené převodníkem. Referenční napětí bylo 4915 mV. Rozsah hodnot, které lze získat je 0-4095. Tedy napětí odpovídající jedné hodnotě je podle vzorce:

$$\frac{\text{referenční napětí}}{\text{počet hodnot}} = \text{napětí na jednu hodnotu} \quad (4)$$

$$\frac{4915}{4096} = 1,19995 \doteq 1,2 \text{ mV} \quad (5)$$

Postup měření:

Na vstup převodníku se nastaví známá hodnota napětí a poté se přečte hodnota, kterou přečte převodník sám. Napětí postupně zvětšujeme, abychom měli regulérní stopu dat. Tento proces provedeme pro oba převodníky. Je důležité, aby kroky napětí byly stejné pro oba převodníky a bylo tak možné porovnat jejich odchylky.

Výsledky měření:

Naměřené napětí [mV]	Převedená hodnota [-]	Převodník 1 [-]	Převodník 2 [-]
95,4	80	81	80
491	409	413	411
741	618	623	621
987	823	830	828
1486	1238	1244	1241
1983	1653	1656	1654
2476	2063	2066	2064
2965	2471	2475	2472
3459	2883	2887	2884
3953	3294	3298	3295
4441	3701	3707	3705

Tabulka 5: Testování ADC

Testování digitál/analogových převodníků proběhlo postupným odečítáním nastavených hodnot napětí a napětí na výstupu převodníků. Oba převodníky se nastavovaly na stejné hodnoty. Nastavená hodnota se přepočítala vynásobením napětí na jednu hodnotu počtem hodnot.

$$1,2 * 100 = 120 \text{ mV} \quad (6)$$

Nastavená hodnota [-]	Teoretické napětí [mV]	Naměřená napětí 1 [mV]	Naměřená napětí 2 [mV]
100	120	114,9	119,3
250	300	293,3	301,4
500	600	596	603
750	900	899	905
1000	1200	1201	1208
1500	1800	1801	1814
2000	2400	2403	2415
2500	3000	3003	3016
3000	3600	3603	3620

Tabulka 6: Testování DAC

Výpočet nejistot:

Při měření jsem měl konstantní referenci, a tak mi nekmitaly hodnoty jak na digitálním multimetru, tak ani při čtení převodníků přes software. Proto nejistota typu A byla vynechána, jelikož je vzhledem k nejistotě typu B zanedbatelná.

A/D převodník má chybu kvantování stanovenou jako:

$$\frac{LSB \text{ převodíku}}{ref. \text{ napětí}} * 100 = \frac{1,2}{4915} * 100 = 0,024 \% \quad (7)$$

Chyba referenčního napájení vzhledem k použitému multimetru je:

- Naměřená hodnota: 4,915 V
- Rozsah: do 40 V
- Rozlišení rozsahu: 0,01 V
- Přesnost měření $\pm (0,8 \% + 1 \text{ digit})$

$$\frac{4,915 * 0,8}{100} + 1 * 0,01 = 0,05 \text{ V} \quad (8)$$

$$\frac{0,05}{4,915} * 100 = 1 \% \quad (9)$$

Chyba měření výstupů digitálním multimetrem je stejná jako u měření referenčního napětí a pohybuje se kolem 1 %.

Z chyb kvantování, nedokonalosti převodníku a zvláště referenčního zdroje jsem odhadl chybu převodníku na $< \pm 1 \%$.

Přesnost měřeného napětí:

Přesnost měřeného napětí jsem odhadl stejnou jako chybu převodníku tedy $< \pm 1 \%$.

Přesnost měřeného proudu:

Zde jsem započítal i přesnost Hallovy sondy, která je dle katalogu $< \pm 1 \%$.

Hallova sonda:

- Rozsah: 5 V
- Přesnost: $< \pm 1 \%$; 0,05 V

Převodník:

- Rozsah: 5 V
- Přesnost: $< \pm 1 \%$; 0,05 V

$$\sqrt{0,05^2 + 0,05^2} = 0,07 \text{ V} \quad (10)$$

$$\frac{0,07}{5} * 100 = 1,4 \% \quad (11)$$

Výslednou přesnost jsem spočítal jako: $< \pm 1,4 \%$.

Výpočet celkové nejistoty by byl složitější, vzhledem k nutnosti započítat i nejistoty, chyby a teplotní závislosti celé analogové části. Mnou uvedené chyby jsou tedy tzv. kvalifikovaným odhadem.

8.2 Testování silové části

Silová část se testovala spolu se zbytkem zařízení jako celek. Pro otestování jsme použili řadu solárních článků. Mezi testovanými byly články typu polykrystalické i monokrystalické struktury. Silové zařízení bylo napájeno pomocí laboratorního zdroje. K porovnání výsledků jsme použili zařízení k měření VA charakteristik solárních panelů PROVA 210. Jako zdroj záření byl použit halogenový reflektor o výkonu 500 W. Zdrojem pro tento reflektor bylo usměrněné napětí 110 V. Nicméně tento zdroj nebyl zcela usměrněn a měl tedy zvlnění, které dosahovalo 5 %. Toto zvlnění je patrné při měření lehkém zvlnění VA charakteristiky.

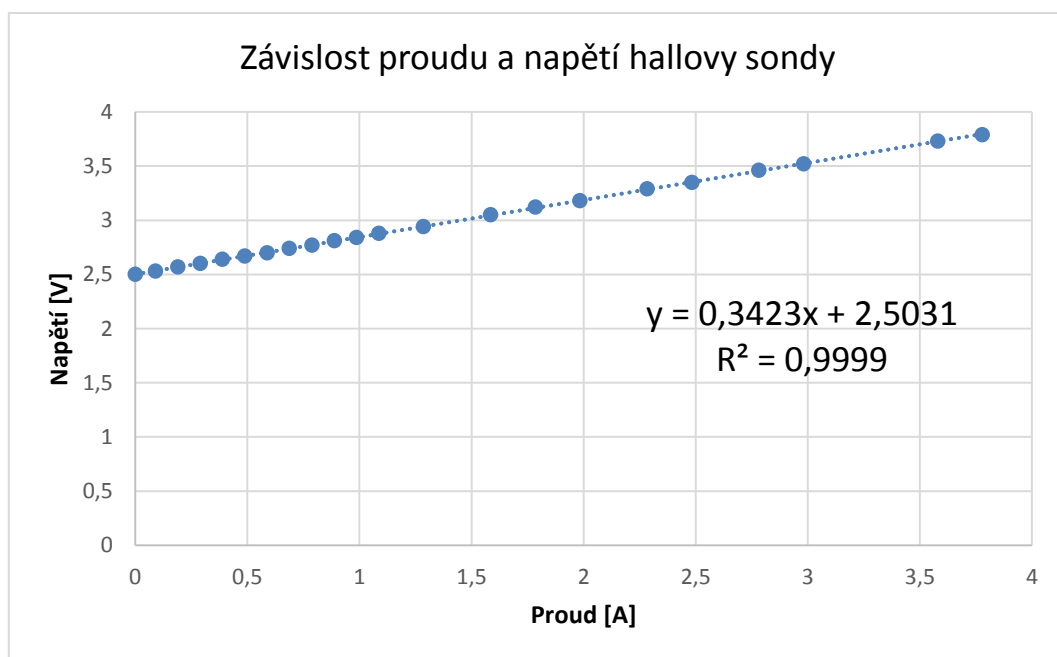
PROVA 210

PROVA 210 je analyzátor solárních článků, u kterého lze měřit VA charakteristiku solárních panelů do napětí 60 V a proudu 12 A. Můžeme zaznamenat až 99 záznamů průběhů grafů. Po změření VA charakteristiky zobrazí PROVA 210 maximální výkon, napětí na prázdko, proud na krátko a účinnost [15].



Obrázek 19: PROVA 210 [15]

Před samotným měřením panelů bylo zapotřebí zjistit přepočítání napětí Hallovy sondy. Místo panelu byl zapojen zdroj proud v sérii s analogovým ampérmetrem. Na výstup Hallovy sondy se připojil voltmetr. Postupně byl zvyšován proud generovaný zdrojem a následně odečteny hodnoty proudu a napětí. Z výsledných hodnot byla vypočtena konstanta a offset. Měření proběhlo při teplotě 25°C.



Graf 1: Závislost proudu a napětí hallovy sondy

Hallova sonda pro testovací zařízení má přepočítání:

Offset: 2,5031

Konstanta: 0,3423

Naměřené hodnoty umožnily i zjištění přesnosti měřeného proudu.

Výpočet přesnosti měřeného proudu:

Jeden krok převodníku je 1,22 mV dle vzorce:

$$\frac{5000}{4096} = 1,22 \text{ mV} \quad (12)$$

- 5000 je referenční napětí.

- 4096 je počet hodnot převodníku.

Z naměřených hodnot vyplývá, že 1290 mV odpovídá 3779 mA, tedy 1 mV odpovídá 2,93 mA.

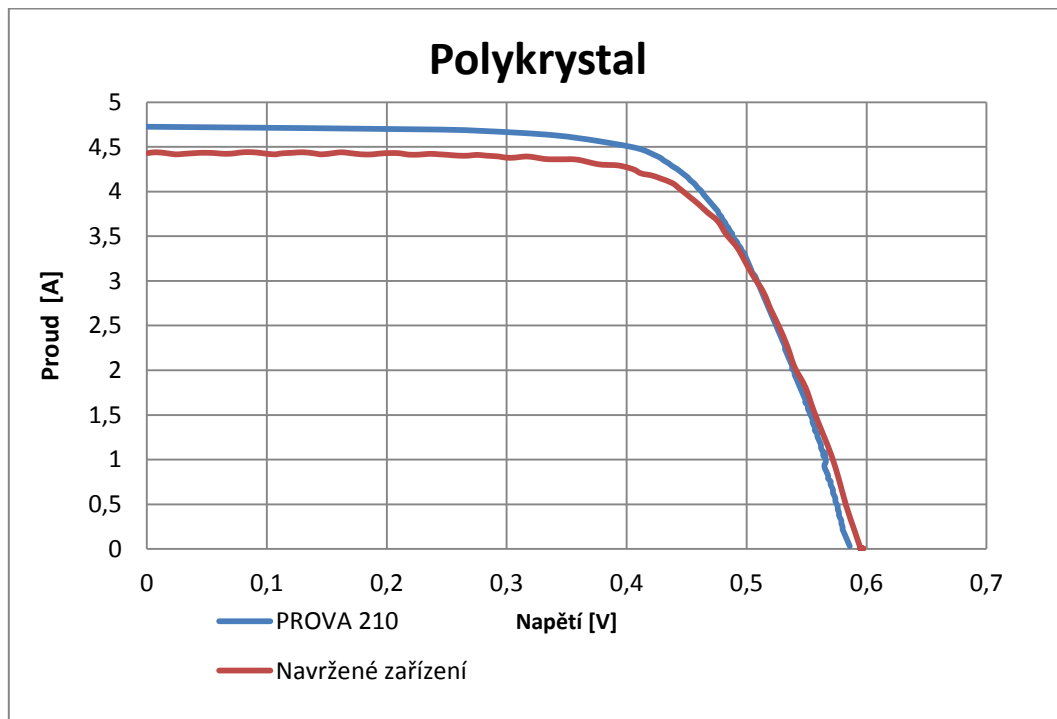
$$2,93 * 1,22 = 3,58 \text{ mA} \quad (13)$$

Převodník tedy čte proud po krocích 3,58mA.

$$\frac{3,58}{4096} * 100 = 0,09 \% \quad (14)$$

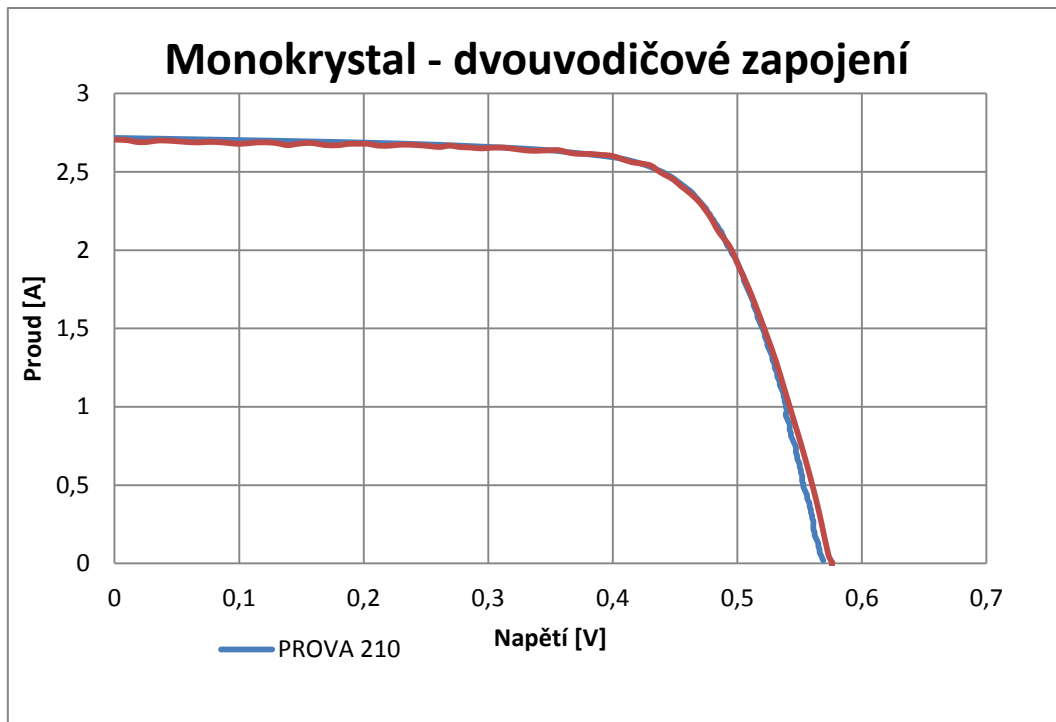
Chyba z kvantování je 0,09%.

Porovnání naměřené charakteristiky s přístrojem PROVA 210



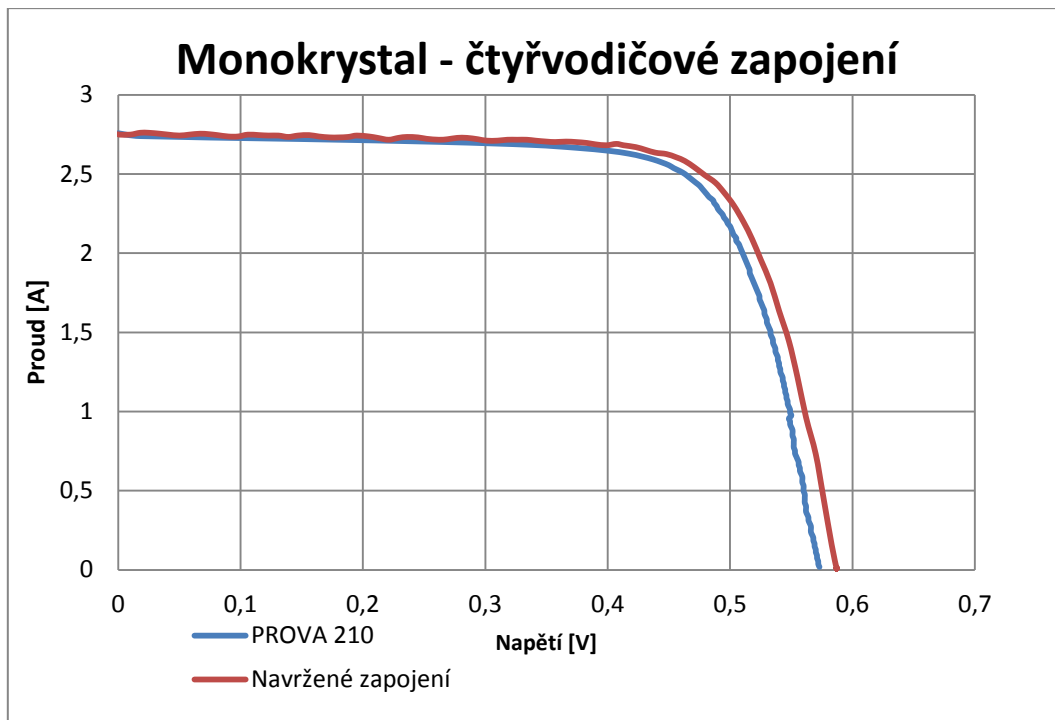
Graf 2: Polykrystal - porovnání

Porovnání dvoudrátového zapojení polykrystalického článku. Měření navrženým zařízením proběhlo dříve, než měření Provou. Tomu odpovídá pokles napětí, vzhledem k lehkému ohřátí článku. Nicméně vzrůst proudu je až moc velký k poměru poklesu napětí.



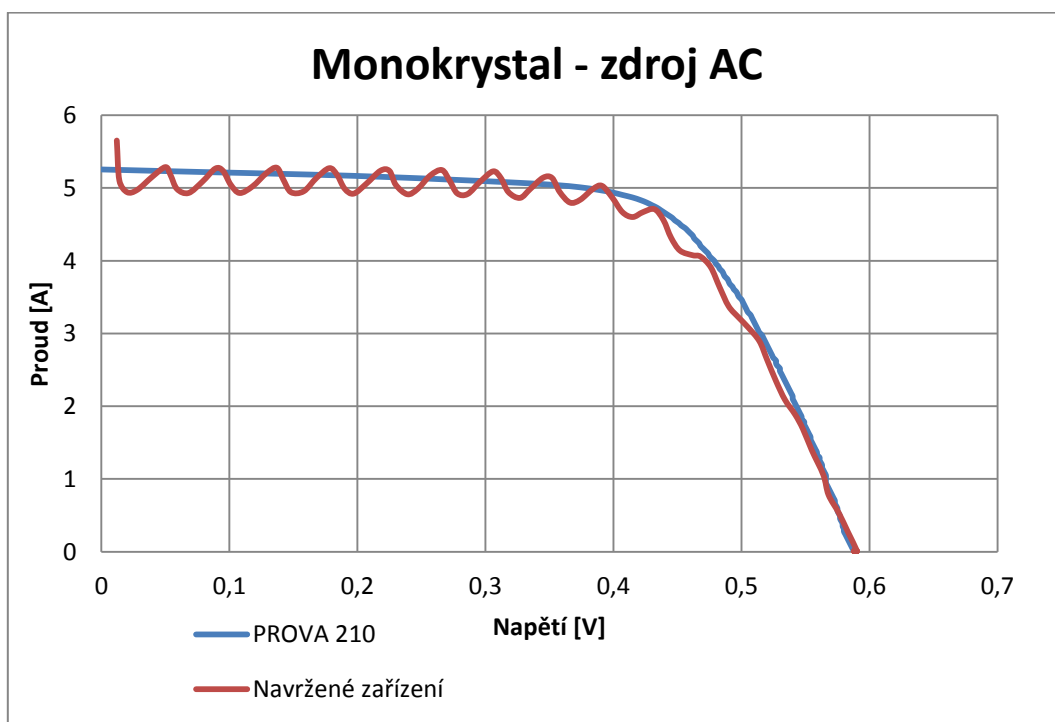
Graf 3: Monokrystal - dvou vodičové zapojení

Porovnání dvoudrátového zapojení monokrystalického článku. Opět proběhlo první měření navrženým zařízením, zde je vidět lehký pokles napětí při měření zařízením PROVA 210 a minimální nárůst proudu.



Graf 4: Monokrystal - čtyřvodičové zapojení

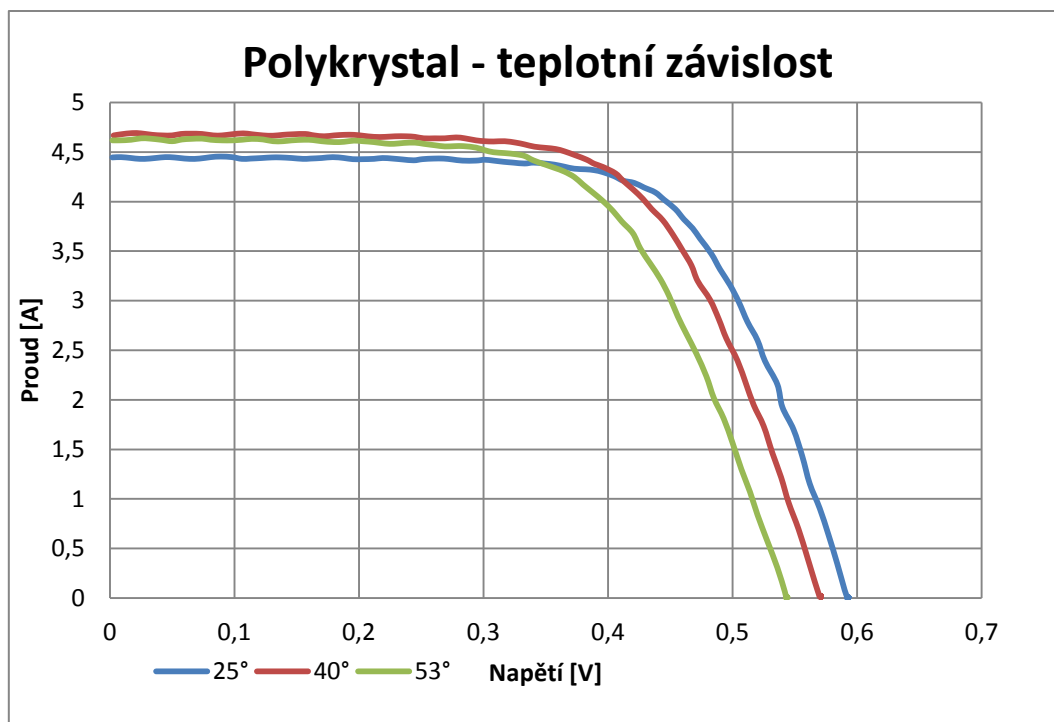
Porovnání čtyřvodičového zapojení monokrystalického článku.



Graf 5: Monokrystal - zdroj AC

Porovnání dvouvodičového zapojení monokrystalického článku. Zde byl halogenový reflektor napájen přímo ze sítě. Na naměřené charakteristice je dobře vidět vliv zdroje světla napájeného ze střídavého zdroje. Tento jev je způsoben vzorkovacím krokem, který byl 10ms, tedy násobek periody

síťového napětí. Odstranění tohoto vlivu je možné například průměrováním více odměrů pro jeden bod VACH.



Graf 6: Polykrystal - teplotní závislost

Vynesené charakteristiky pro teplotní závislost polykrystalického solárního článku. Zahřívání článku proběhlo pomocí infračerveného záření z halogenového reflektoru. Na teplotu 53°C se čekalo poměrně dlouho a v důsledku toho se ohřála i silová část. Změnou teplot součástek se zdá, že se mění i přepočítaný proud na napětí hallovovy sondy. Toto by mohlo způsobit fakt, že při vyšší teplotě je naměřený proud lehce nižší (v řádu desetin ampérů) než při nižší teplotě, ačkoliv by měl být vyšší.

9 Závěr

Cílem této práce byla realizace číslicově řízeného systému pro měření voltampérových charakteristik fotovoltaických článků. Silová a analogová část byla převzata od Ing. Martina Horáka, který společně s Ing. Vojtěchem Vignerem navrhl systém na měření FV článků bez vlivu parazitních odporů. Tato část byla sestavena a jejím výstupem jsou dva analogové signály, které reprezentují napětí a proud FV panelu. Pro převod analogových signálů do digitálních jsem navrhl desku plošných spojů, která obsahuje dva A/D převodníky a dva D/A převodníky. Jako mezičlánek pro propojení navržené desky a PC jsem použil elektronickou platformu Arduino. Deska komunikuje s Arduinem pomocí sběrnice I²C a pro větší bezpečnost je tato sběrnice galvanicky oddělena. První testování proběhlo jako test komunikace Arduina s navrženou deskou. Pomocí jednoduchého programu bylo možné bez problému ovládat převodníky, a tak získávat nebo posílat data. V druhé části bylo potřeba naprogramovat uživatelské prostředí na straně PC. Program i grafické rozhraní bylo tvořeno ve vývojovém prostředí NetBeans a komunikuje s Arduinem přes kabel USB. Celou sestavu jsme otestovali pomocí třech fotovoltaických článků, viz příloha 4-6. Po překonání počátečních problémů celá sestava dobře fungoval a bylo tak možné změřit FV články a porovnat výsledky z přístrojem PROVA 210.

Vylepšení hardware:

Zde bych navrhoval do budoucna vylepšit stabilitu referenčního napájení, místo integrovaného obvodu LM317 bych zvolil nějakou vhodnější variantu, jako například TL431.

Vylepšení software Arduino:

Zde by bylo vhodné upravit cyklus čtení dat z převodníků, tak aby toto čtení proběhlo několikrát a následně se zprůměrovalo. Tato úprava by značně omezila vliv střídavého zdroje na průběh VA charakteristiky.

Vylepšení software PC:

Zde bych navrhoval upravit nastavení času mezi jednotlivými kroky, tak aby bylo možné nastavení času mimo násobky 10ms a tak vzorkovat mimo frekvenci 50Hz

Seznam použité literatury

- [1] HORÁK, Martin a Vojtěch VIGNER. Advanced Measurement of Photovoltaic Cells. POSTER 2014 - 18th International Student Conference on Electrical Engineering. Praha, 2014, 18(EI12), 4. ISBN 978-80-01-05499-4
- [2] Fotovoltaika: Nejpoužívanější pojmy ve fotovoltaice. *Tzbinfo* [online]. Ing. Bronislav Bechník, Ph.D., 2014 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/11772-nejpouzivanejsi-pojmy-ve-fotovoltaice>
- [3] HAASZ, Vladimír a Miloš SEDLÁČEK. *Elektrická měření: Přístroje a metody*. 2. vydání. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-01-01717-6.
- [4] Převodníky. *E-automatizace: Informační portál z oblasti automatizace* [online]. Lubomír Smutný [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: http://www.e-automatizace.cz/ebooks/ridici_systemy_akcni_cleny/Prevodniky.html
- [5] GNU General Public License. *Wikipedie: Otevřená encyklopedie* [online]. Příspěvatelé Wikipedie, 2015 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=GNU_General_Public_License&oldid=13148857
- [6] KiCAD - popis. *KiCAD a vše o návrhu a zhotovení plošných spojů* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.kicad.wbs.cz/KiCAD---popis.html>
- [7] Odkaz na potřebnou softwarovou podporu. <http://www.oracle.com/technetwork/java/javase/downloads/jre8-downloads-2133155.html>
- [8] VODA, Zbyšek a tým HW Kitchen. Průvodce světem Arduina. Bučovice: Nakladatelství Martin Stříž, Bučovice, 2015. ISBN 978-80-87106-90-7.
- [9] Arduino Board Uno. *Arduino.cc* [online]. 2016 [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno#>
- [10] Stručný popis sběrnice I2C a její praktické využití k připojení externí eeprom 24LC256 k mikrokontroléru PIC16F877. *Vyvoj.hw.cz: Profesionální elektronika* [online]. Redakce HW serveru, 2000 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://vyvoj.hw.cz/navrh-obvodu/strucny-popis-sbornice-i2c-a-jeji-prakticke-vyuziti-k-pripojeni-externi-EEPROM-24LC256>
- [11] I²C. *Wikipedie: Otevřená encyklopedie* [online]. Příspěvatelé Wikipedie, 2015 [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=I%C2%B2C&oldid=13064047>
- [12] Universální sériová sběrnice (USB). *Root.cz* [online]. Pavel Tišnovský, 2009 [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: <http://www.root.cz/clanky/universalni-seriova-sbornice-usb/>
- [13] Komunikační protokol universální sériové sběrnice. *Root.cz* [online]. Pavel Tišnovský, 2009 [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: <http://www.root.cz/clanky/komunikacni-protokol-universalni-seriove-sbornice/>
- [14] Arduino a USB. *Uart.cz* [online]. Vlastimil Slinták, 2012 [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: <http://uart.cz/394/arduino-a-usb/>
- [15] Analyzátor solár. článků PROVA 210. *Micronix* [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://eshop.micronix.cz/merici-technika/elektricke-veliciny/analyzatory-fv-panelu/prova-210.html>

- [16] KLIMT, Kristián. *Jednoduchý DAQ systém*. Praha, 2016. Individuální projekt. ČVUT FEL. Vedoucí práce Ing. Pavel Hrzina, Ph.D.
- [17] Microchip. MCP3221 [online]. [cit. 2016-05-23]. 2002. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21732D.pdf>
- [18] Microchip. MCP4725 [online]. [cit. 2016-05-23]. 2007. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/datasheets/BreakoutBoards/MCP4725.pdf>
- [19] Texas instruments. LM317 [online]. [cit. 2016-05-23]. 2014. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm317.pdf>
- [20] Analog Devices. ADUM1250 [online]. [cit. 2016-05-23]. 2006. Dostupné z: http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADUM1250_1251.pdf

Seznam obrázků

Obrázek 1: VA charakteristika FV článku [2].....	3
Obrázek 2: Měření fotovoltaických článků	4
Obrázek 3: Převodník proudu na napětí s operačním zesilovačem [1]	5
Obrázek 4: Převodník proudu na napětí s operačním zesilovačem a parazitními odpory [1]	5
Obrázek 5: Čtyř vodičové zapojení OZ [1]	6
Obrázek 6: Schéma silové části - upraveno z [1]	6
Obrázek 7: Komunikace.....	7
Obrázek 8: Převodník s postupnou aproximací[4]	8
Obrázek 9: Schéma DAQ systému	10
Obrázek 10: Deska plošného spoje DAQ systému.....	12
Obrázek 11: UI PC programu.....	14
Obrázek 12: Graf vytvořený programem	15
Obrázek 13: Vývojový diagram PC programu	15
Obrázek 14: Arduino IDE	18
Obrázek 15: Vývojový diagram Arduino	20
Obrázek 16: Propojení I2C [10]	21
Obrázek 17: Přenos I2C [11].....	22
Obrázek 18: USB logo[12].....	23
Obrázek 19: PROVA 210 [15]	27
Graf 1: Závislost proudu a napětí hallovy sondy.....	27
Graf 2: Polykrystal - porovnání.....	28
Graf 3: Monokrystal - dvou vodičové zapojení.....	29
Graf 4: Monokrystal - čtyřvodičové zapojení	30
Graf 5: Monokrystal - zdroj AC	30
Graf 6: Polykrystal - teplotní závislost.....	31

Seznam tabulek

Tabulka 1: Piny strana Silová část	10
Tabulka 2: Piny strana Arduino.....	11
Tabulka 3: Specifikace Arduino Uno [9]	17
Tabulka 4: Popis paketů	23
Tabulka 5: Testování ADC.....	24
Tabulka 6: Testování DAC.....	25

Seznam příloh

Příloha 1: Popis přidávaných paketů.....	38
Příloha 2: Použité Arduino	38
Příloha 3: Osazený DAQ systém.....	39
Příloha 4: Dvou vodičový monokrystalický článek	39
Příloha 5: Čtyřvodičový monokrystalický článek	40
Příloha 6: Polykrystalický článek.....	40
Příloha 7: Software pro Arduino (na CD)	40
Příloha 8: Software pro PC (na CD).....	40

Přílohy

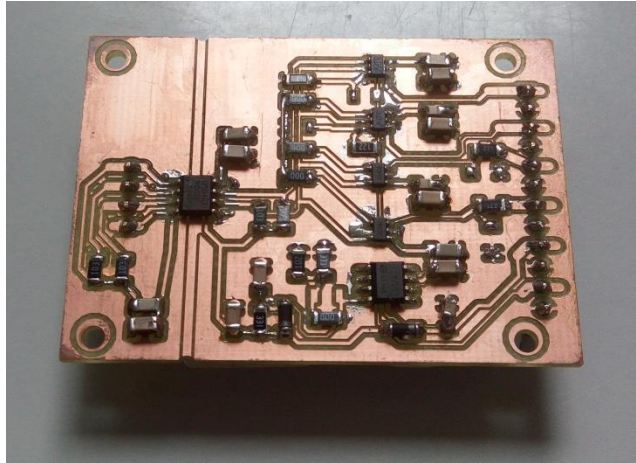
Po sepsání bakalářské práce došlo k úpravě softwaru. Úprava dat pomocí konstant a offsetů neprobíhá na straně PC, ale na straně Arduina. Nastavené parametry se odesílají do platformy Arduino, kde se zapíší do paměti EEPROM. Díky tomuto se nemusí znova nastavovat parametry při každém zapnutí softwaru na straně PC. Popis paketů viz tabulka příloha 1.

Příkaz	Popis	Odpověď	poznámka
ux	Nastaví hodnotu offset 1	-	x je hodnota získaná od uživatele
ix	Nastaví hodnotu konstanty 1	-	x je hodnota získaná od uživatele
ox	Nastaví hodnotu offset 2	-	x je hodnota získaná od uživatele
px	Nastaví hodnotu konstanty 2	-	x je hodnota získaná od uživatele

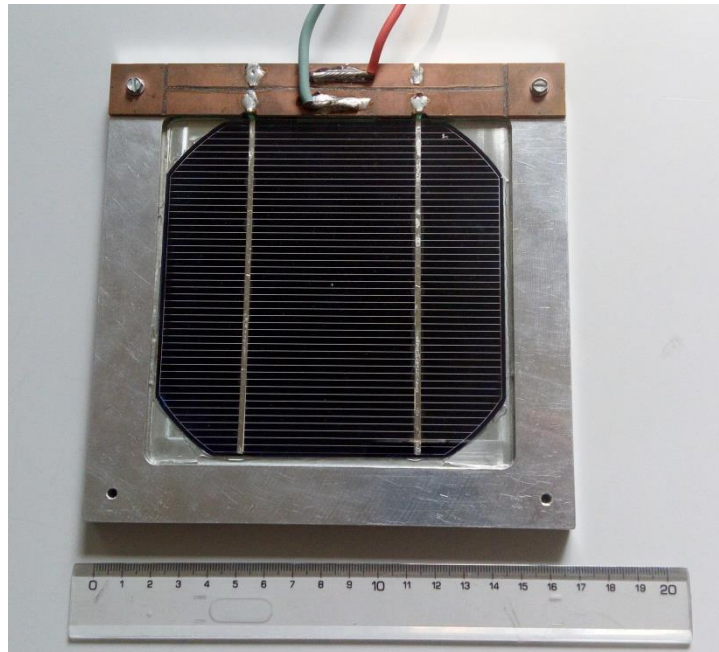
Příloha 1: Popis přidávaných paketů



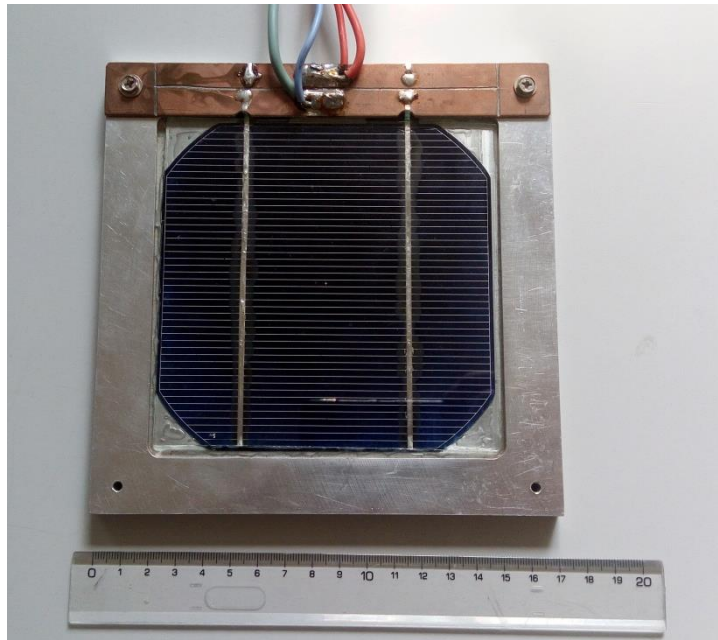
Příloha 2: Použité Arduino



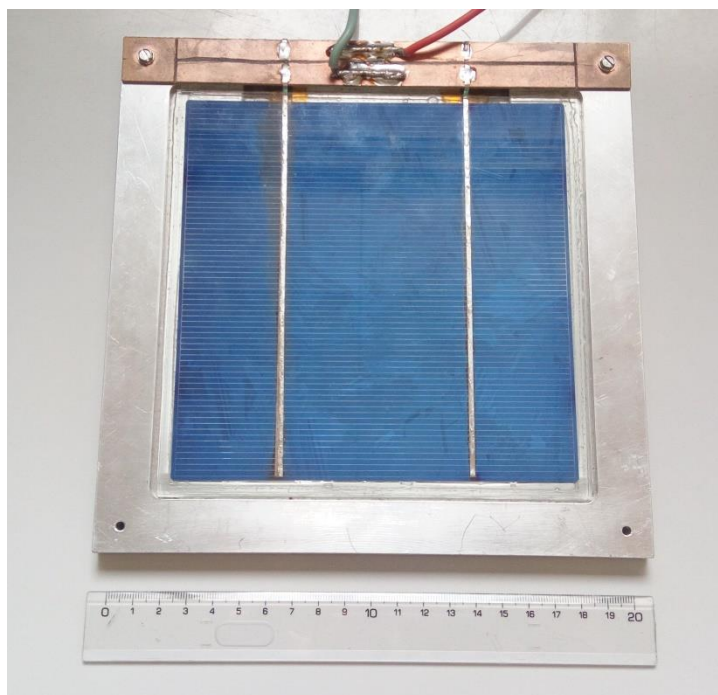
Příloha 3: Osazený DAQ systém



Příloha 4: Dvouvodičový monokrystalický článek



Příloha 5: Čtyřvodičový monokrystalický článek



Příloha 6: Polykrystalický článek

Příloha 7: Software pro Arduino (na CD)

Příloha 8: Software pro PC (na CD)