



**FAKULTA  
ELEKTROTECHNICKÁ  
ČVUT V PRAZE**

**Zařízení pro měření spektrální odezvy  
fotovoltaických článků**

**Jan Bitter**

**Praha**

**2019**



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Bitter** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **466039**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrotechnologie**  
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**  
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Zařízení pro měření spektrální odezvy fotovoltaických článků**

Název bakalářské práce anglicky:

**Equipment for Photovoltaic Cells Spectral Response Measurement**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Zpracujte rešerši na téma měření spektrální odezvy PV článků
- 2) Navrhněte zařízení pro měření spektrální odezvy s využitím kontinuum laseru
- 3) Zařízení zkonztruujte a navrhněte základní program pro jeho řízení
- 4) U zařízení ověrte funkčnost

Seznam doporučené literatury:

- [1] LUQUE, A., HEGEDUS, S. Handbook of photovoltaic science and engineering [online]. 2. Hoboken, NJ: Wiley, c2011. ISBN 978-0-470-97466-7. Available at: <http://eu.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-0470976128.html>  
[2] ALONSO-ABELLA, M., F. CHENLO, G. NOFUENTES a M. TORRES-RAMÍREZ. Analysis of spectral effects on the energy yield of different PV (photovoltaic) technologies: The case of four specific sites. Energy [online]. 2014, 67, 435-443. DOI: 10.1016/j.energy.2014.01.024. ISSN 03605442. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544214000310>

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Ladislava Černá, Ph.D., katedra elektrotechnologie FEL**

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

Datum zadání bakalářské práce: **14.02.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

Platnost zadání bakalářské práce: **20.09.2020**

Ing. Ladislava Černá, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
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.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta



## Anotace

Práce se zabývá problematikou měření spektrální odezvy fotovoltaických článků a modulů. V úvodu práce jsou shrnuty hlavní parametry článků a používané metody měření spektrální odezvy. V další části práce je navrženo konstrukční řešení přípravku využívajícího pro měření spektrální odezvy nový způsob - kontinuum laser. Poslední část práce je věnována popisu základního řízení přípravku, které bylo realizováno prostřednictvím vývojové desky Arduino UNO a nadřazeného řídicího systému Labview.

**Klíčová slova:** spektrální odezva fotovoltaických článků, fotovoltaika, Arduino, Labview, kontinuum laser

## Annotation

The thesis deals with the photovoltaic cells and modules spectral response measurement. In the introduction part, the main parameters of the cells and the methods used for measuring the spectral response are summarized. In the next part of the thesis, a construction design of a device using a new method - a continuum laser - is proposed. The last part of the work is focused on the description of the basic control of the constructed measuring device, which was implemented through the development board Arduino UNO and the superior control system Labview.

**Keywords:** photovoltaic cells spectral response, photovoltaics, Arduino, Labview, continuum laser



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 dne

Jan Bitter



### **Poděkování:**

Dovolte mi, abych úvodem své práce poděkoval Ing. Ladislavě Černé, Ph.D. za vedení a poskytnuté postřehy k mé práci. Mé poděkování také patří Ing. Pavlu Hrzinovi, Ph.D., který mi poskytl užitečné rady a připomínky potřebné ke konstrukci pohybového aparátu i jeho rozpohybování pomocí řídicího softwaru. V neposlední řadě bych rád poděkoval své rodině, která mi podala pomocnou ruku při řešení každodenních starostí během tvorby této práce.



# Obsah

1	Úvod .....	14
2	Teoretický úvod .....	14
2.1	Prvopočátky světla.....	14
2.1.1	Popis světla pomocí vlnění .....	14
2.1.2	Popis světla pomocí částic.....	15
2.1.3	Fotoelektrický jev .....	16
2.1.4	Elektromagnetické spektrum AM1.5.....	17
2.2	Fotovoltaické články.....	17
2.2.1	Základní princip .....	17
2.2.2	Vývoj fotovoltaických modulů .....	20
2.2.3	Odraživost a propustnost.....	20
2.2.4	V-A charakteristika.....	21
2.2.5	Spektrální odezva .....	22
2.2.6	Miss match factor – faktor spektrální neshody .....	25
3	Měření spektrální citlivosti.....	26
3.1	Měření spektrální citlivosti na univerzitě Óbuda .....	26
3.2	Měření spektrální citlivosti společnosti Amonix .....	28
3.3	Možnosti měření spektrální citlivosti.....	31
3.3.1	Spektrální filtry .....	31
3.3.2	Monochromátor.....	32
3.3.3	Kontinuum laser .....	33
3.4	Závěr .....	34
4	Měřicí přípravek .....	35
4.1	Konstrukční popis .....	35
4.1.1	Základní stavební prvky .....	35
4.1.2	Pohybový mechanismus .....	37
4.1.3	Logika řízení .....	39
4.2	Softwarové řešení .....	40
4.2.1	Program Wiring .....	40
4.2.2	Uživatelské rozhraní Labview .....	47
5	Závěr .....	48
6	Reference .....	49



## **Seznam použitých zkratek**

m-Si	monokrystalický křemík
p-Si	polykrytalický křemík
EFG	páskový křemík
m-Si BCC	monokrystalický křemíkový článek se zadním kontaktem
HIT	více přechodový článek s vnitřní tenkou vrstvou
CIS	Měď Indium Selenid (Copper Indium Selenide)
CdTe	kadmium telurid
a-Si	amorfní křemík
PV	fotovoltaika ( <i>subst.</i> ), fotovoltaický ( <i>adj.</i> )

# 1 Úvod

V dnešní době je kladen nemalý důraz na ekodesign a získávání elektrické energie, která je šetrná vůči životnímu prostředí. Dostává se do popředí problematika účinnosti fotovoltaických modulů, neboť právě fotovoltaické moduly představují možnost získání tzv. „zelené“ elektrické energie. S tím souvisí nejen instalovaný výkon fotovoltaických panelů, ale také jejich rozvoj a snaha zvýšení jejich účinnosti a v neposlední řadě prodloužení jejich životnosti.

Pro získání co nejvyšší účinnosti fotovoltaických modulů je nutné uvažovat mnoho faktorů, kterými jsou např. úhel natočení panelu, geografická poloha, materiálové složení panelu nebo teplota okolí, která může nadměrně ohřívat fotovoltaický modul. Tyto aspekty jsou zohledněny ve spektrální analýze, kterou se tato práce zabývá. Spektrální analýza definuje pojem spektrální citlivost, který udává poměr mezi dopadající solární energií na modul a energií, kterou modul přemění na energii elektrickou.

## 2 Teoretický úvod

### 2.1 Prvopočátky světla

Jelikož jsou fotovoltaické moduly navrženy, aby získávaly energii ze slunečního záření, je nezbytné ozjevit pojmy související s optikou. Slunce produkuje nemalé množství energie a malou částí z něj je světlo, které se jako elektromagnetické vlnění dostává ze slunce na zem. Toto záření je schopno přenášet energii na velké vzdálenosti, a to i ve vakuu, proto lze využít energii ze slunce, i když je slunce vzdálené téměř 150 000 000 kilometrů. Elektromagnetické spektrum definuje světlo jako vlnu o určité vlnové délce. Tento popis se datuje již do počátků 19. století, kdy byl proveden experiment [1], který ukázal interferenci světelných paprsků a potvrdil tak, že světlo je vlnění. V roce 1800 se však objevil problém při popisování světla jako vlnění, neboť pokusy měření spektra vlnových délek se nedalo popsat vlnovou rovnicí. Tento problém byl vyřešen až v roce 1900 německým fyzikem Maxem Planckem, který poprvé zavedl pojem kvant energie. Problematicou kvantování energie se následně Max Planck zabýval s Albertem Einsteinem a za její zkoumání společně s problematikou fotoelektrického jevu získali v letech 1918 a 1921 Nobelovu cenu. Výstupem jejich práce je moderní definice částice nazývané foton, která je úzce vázaná se světlem. V dnešní době díky témtoto objevům definujeme za pomocí kvantové mechaniky světlo jako částici i jako vlnu. Takovéto chování se nazývá duální povahou světla.

#### 2.1.1 Popis světla pomocí vlnění

V předchozí kapitole bylo světlo definováno nejen jako částice, ale i jako elektromagnetické záření, které se šíří v podobě vlnění. Toto záření vzniká jako důsledek příčného postupného vlnění elektrického a magnetického pole, které je

vybuzeno při pohybu elektrického náboje  $Q$ . Každá vlna má své specifické vlastnosti, které jsou popsány následujícími parametry:

$c$  [m/s] rychlosť šíření světla ve vakuu (299 792 458 m/s)

$f$  [Hz] frekvence

$\lambda$  [m] vlnová délka

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

Pomocí výše uvedeného vztahu byla definována vlnová délka jako základní parametr elektromagnetické vlny, pomocí níž lze blíže popsat vlnění emitované nejbližší hvězdou planety Země, a které tvoří majoritní část záření dopadajícího na naši planetu z kosmu. Slunce emituje záření v širokém spektru vlnových délek, mezi kterými se vyskytuje i světlo viditelné lidským okem. Právě tato oblast světla je důležitá pro naše pozorování, neboť se jedná o oblast citlivosti fotovoltaických modulů. Oblast viditelného světla je zobrazena na obrázku 1, kde je patrné, že začíná již v ultrafialové části s vlnovou délkou  $\lambda = 400$  nm a postupně přechází až do infračerveného záření o vlnové délce  $\lambda = 700$  nm [2].

### 2.1.2 Popis světla pomocí častic

Popisem světla jako částice se zabýval na počátku 20. století německý fyzik Albert Einstein, který definoval vlastnosti fotonu, kterými jsou energie  $\vec{E}$ , hybnost  $\vec{p}$  a hmotnost  $m$ . Právě ve své teorii relativity uvedl myšlenku, že foton musí mít nulovou klidovou hmotnost. Ze své speciální teorie relativity poté stanovil relativistickou hmotnost fotonu pomocí následujícího vztahu:

$$E = mc^2 \rightarrow m = \frac{E}{c^2} \quad (2)$$

Energie fotonů je stanovena vztahem

$$\vec{E} = h\vec{\nu} = h\frac{\vec{c}}{\lambda} \quad (1)$$

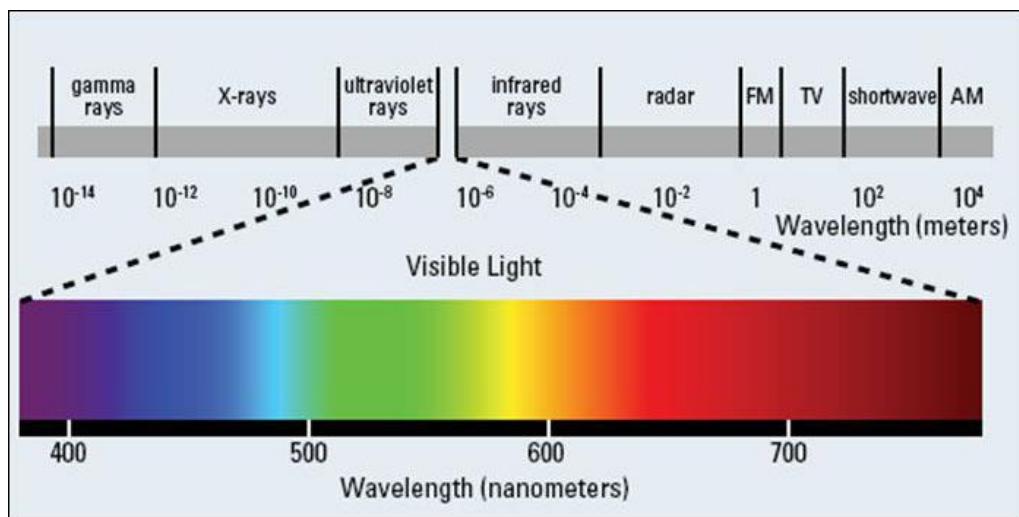
$h$  [Js] Planckova konstanta ( $6,626 \cdot 10^{-34}$  [J.s])

$\vec{\nu}$  [Hz] frekvence fotonu

Definice hybnosti fotonu

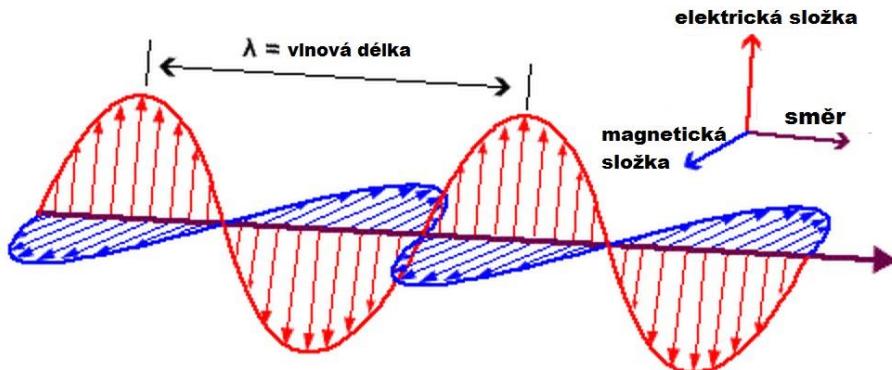
$$\vec{p} = \frac{h}{\lambda} \quad (4)$$

Z rovnice 3 je zřejmé, že fotony nižších vlnových délek mají nižší energii než fotony větší vlnové délky. Toto je zásadní poznatek pro zkoumání účinnosti fotovoltaických modulů, díky kterému lze předpokládat vyšší účinnost při dopadu UV záření na modul než při dopadu infračerveného záření. Spektrální analýza účinnosti je tak pro celkovou účinnost výsledného modulu klíčová [2].



Obrázek 1 - Rozdělení světla do složek podle vlnové délky [3]

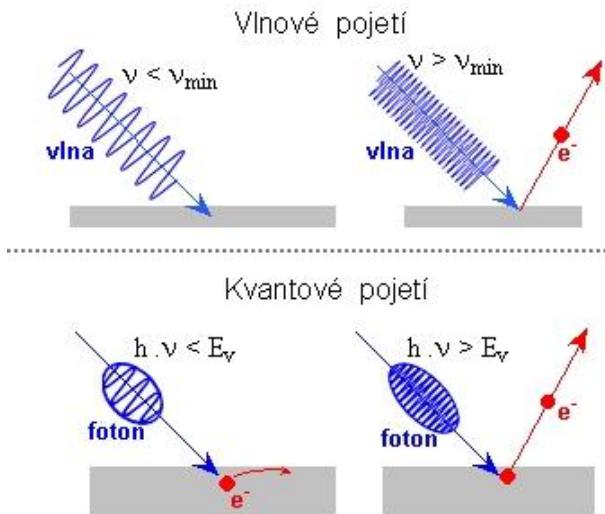
### Elektromagnetické pole



Obrázek 2 - Elektromagnetická vlna [4]

#### 2.1.3 Fotoelektrický jev

Této problematice se hojně na začátku 20. století věnoval uznávaný německý fyzik Albert Einstein a za jeho vysvětlení v roce 1921 obdržel Nobelovu cenu za fyziku. Ve své studii popsal fotoelektrický jev jako proces, při kterém jsou elektrony vystřelovány z látky ven po dodání dostatečného množství energie pomocí elektromagnetického záření. Proces, při kterém jsou elektrony uvolňovány z látky nazýváme fotoelektrickou emisí a jednotlivé elektrony, které opustí látku označujeme jako fotoelektrony. Pakliže je povrch materiálu ozařován elektromagnetickým zářením dostatečné energie, tak dochází k emitování fotoelektronů, které jsou vyzařovány do okolního prostředí. V případě, že dochází k uvolnění elektronu, avšak již nedochází k jeho emisi z příslušného materiálu do okolí, stává se takový elektron tzv. vodivostním elektronem, který setrvává v materiálu. Tento jev poté nazýváme vnitřním fotoelektrickým jevem (vnitřním fotoefektem). U fotoelektrického jevu může nastat ještě tzv. inverzní stav, a to v případě, že na materiál dopadají elektrony, které tak způsobují vyzařování fotonů [5].



Obrázek 3 - Ozařování materiálu při fotoefektu [1]

#### 2.1.4 Elektromagnetické spektrum AM1.5

Spektrum AM1.5 (atmospheric mass) udává celkové rozložení slunečního záření, které odpovídá hodnotě  $1000 \text{ W/m}^2$ . Jedná se o složení difuzního, odraženého a přímého záření, které ve výsledku tvoří celkovou ozářenosť  $1000 \text{ W/m}^2$ . Spektrum AM1.5 se také využívá jako referenční hodnota odpovídající určitému souboru atmosférických podmínek. V závislosti na odchylce od těchto specifických atmosférických podmínek lze pozorovat změny výkonu venkovních fotovoltaických zařízení, z čehož je patrné, že k odchylce od referenčního spektra dochází v závislosti na konkrétním typu použitého fotovoltaického článku a klimatických podmínkách, ve kterých je instalován. Ke změnám v rozložení fotonového toku dochází při změně těchto podmínek: vysrážená voda, obsah ozonu, atmosférický tlak, zkalení a standardizované koncentrace  $\text{CO}_2$  [5].

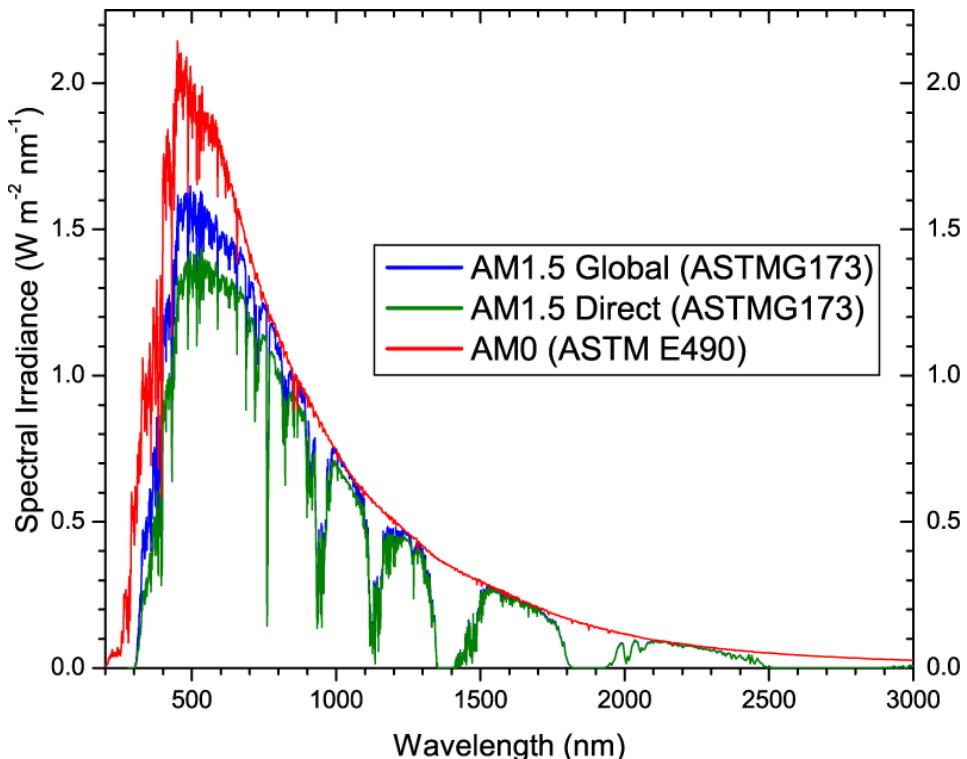
## 2.2 Fotovoltaické články

### 2.2.1 Základní princip

Účelem fotovoltaických článků je přeměna slunečního záření na elektrickou energii. Vytvoření fotovoltaického článku je náročným procesem, který začíná odleptáním zhmožděné vrstvy křemíku. Na takto předpřipraveném povrchu se provádí tzv. texturace, která snižuje odrazivost povrchu z více než 30% na 11%. Dalším krokem je vložení křemíkového článku do difuzní pece, do které je vháněn fosfor při vysoké teplotě. Fosfor proniká do povrchu křemíkové destičky a utváří se PN přechod. Pro zvýšení absorpce slunečního záření, která vede ke zvýšení účinnosti, se poté nanáší antireflexní vrstva při procesu zvaném anti-reflective coating (ARC). Články se vloží do pece a jsou na povrchu potaženy nitridem křemičitým ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), což má za následek snížení odrazivosti povrchu a společně s texturováním povrchu dochází ke snížení odrazivosti až na 1% pro určité rozsahy spektra. Pátým krokem výroby je tzv. screen printing neboli sítotisk, při kterém se

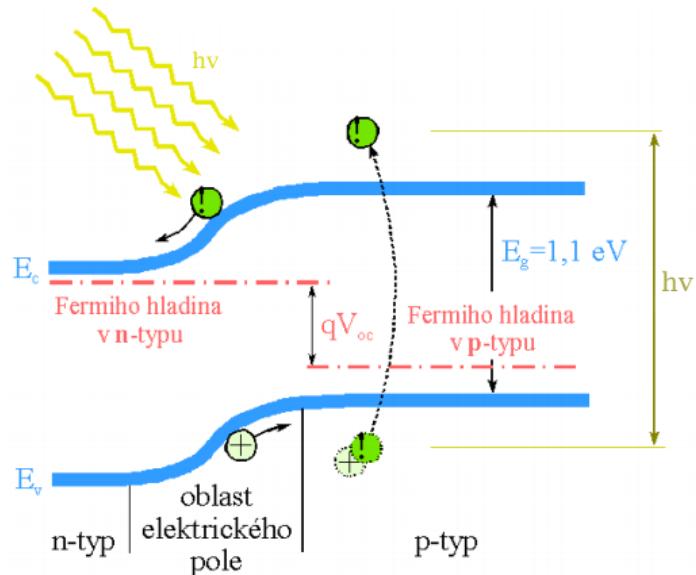
nanáší kontakty z hliníku, popř. ze stříbra ve formě pasty. Takto připravené kontakty se vyžíhají v peci při  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Posledním krokem při výrobě článků je měření parametrů a třídění jednotlivých článků [6].

Osvítíme-li takový článek slunečním zářením, tak se z krystalové mřížky uvolní elektrony, které obdrží dostatečnou energii, díky které jsou schopny překonat zakázaný pás (šířka zakázaného pásu –  $E_g$ ) v obr. 5.

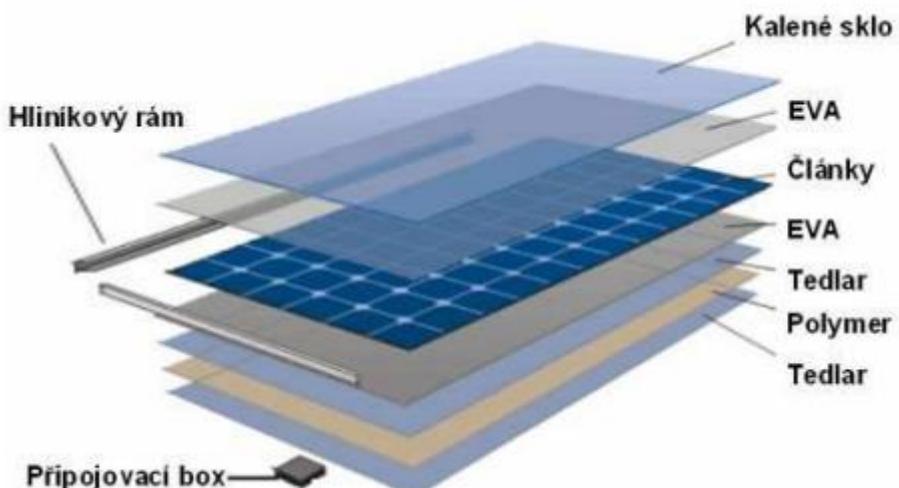


Obrázek 4 - Průběh referenčního spektra [7]

Pro praktické využití a dosažení požadovaného výkonu se fotovoltaické články řadí v sériových a paralelních kombinacích do tzv. fotovoltaických modulů. Při ozáření fotovoltaického modulu je generováno napětí okolo cca 0,5 V. Pro jeho navýšení jsou články řazeny do série pomocí spojení pájením plochých drátků (pásy). Fotovoltaický modul je tedy soubor článků, které jsou hermeticky uzavřeny, aby mohly čelit povětrnostním podmínkám v místě instalace. Konstrukce fotovoltaických modulů se liší podle jejich typu a jejich využití [6].



Obrázek 5 - Šířka zakázaného pásu Si článku [8]



Obrázek 6 - Struktura Si PV modulu [8]

Z obrázku 6, na kterém je zobrazena struktura Si modulu, je patrné, že celý modul je vyráběn metodou tzv. sendviče. Na přední krycí sklo je položena laminační folie (nejčastěji etyl-vinyl-acetát – EVA). Na tuto folii jsou umístěny samotné fotovoltaické články (již spojené pájením), které jsou přikryté druhou vrstvou laminační folie, aby se zajistila ochrana z obou stran. Dále je sestava doplněna o zadní krycí folii, nejčastěji Tedlar, popř. Tefzel proložený vrstvou polymeru. Tato konstrukce zajišťuje ochranu fotovoltaických článků proti povětrnostním podmínkám a plní stejnou roli, jako kalené sklo z přední strany. Celá konstrukce je za zvýšené teploty (cca 120 °C) slisována dohromady a posléze vložena do kovového rámu, který se nachází po celém obvodu sendviče a umožňuje snazší montáž při instalaci modulu. Na zadní stranu modulu je namontován připojovací box, ve kterém se nachází samotná svorkovnice pro připojení k vnější síti. I když

je takto vyrobený modul odolný, nelze zcela zabránit jeho degradaci. Při běžné instalaci ve vnějším prostředí se kalené sklo zanáší nečistotami a klesá účinnost celého modulu. Jelikož je možné snadné omytí panelu, tak se nejedná o majoritní problém poklesu účinnosti. Mnohem větším problémem je degradace použité EVA folie, která díky UV složce slunečního záření degraduje. Dochází k jejímu zažloutnutí a ke změně optických vlastností. Této problematice se budeme zabývat v následující kapitole [8].

### **2.2.2 Vývoj fotovoltaických modulů**

Fotovoltaické články běžně klasifikujeme do tří generací. Každá generace se snaží o jistý druh revoluce ve fotovoltaice a tím zvýšení účinnosti fotovoltaických článků. První generace je založena na principu destiček vyrobených z krystalického křemíku, ve kterých se nachází velkoplošný P-N přechod. K dosažení vysoké účinnosti těchto článků je nezbytné využití kvalitních materiálů, což podstatně navýšuje jejich cenu. V dnešní době však díky dramatickému poklesu jejich ceny představují více než 90 % celkového objemu vyráběných fotovoltaických modulů. Jejich účinnost se pohybuje mezi 16 %-19 % [8].

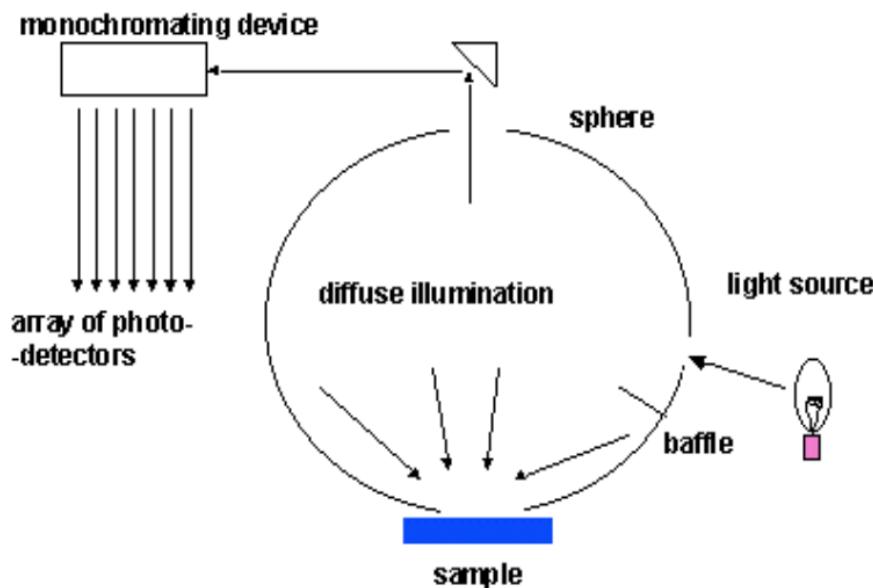
Druhá generace fotovoltaických článků vznikla jako odpověď na hlavní problém článků první generace, kterým byla vysoká pořizovací cena. Základním principem je při stejných světelných vlastnostech snížení množství potřebného materiálu pro jejich výrobu. Články druhé generace jsou z tohoto důvodu vyrobeny na bázi tenkých vrstev, které mají tloušťku v řádech  $\mu\text{m}$ . K výrobě článků druhé generace se používá nejčastěji amorfni, mikrokrytalický, popř. polykrytalický křemík. Články druhé generace mají za následek požadované snížení ceny, avšak vzhledem k použitým materiálům, které mají vyšší ztráty než první generace, což je dáno vadami ve struktuře, dochází i ke snížení jejich účinnosti, která se pohybuje okolo 10 %. Mezi druhou generaci patří také další tenkovrstvé materiály, jako např. CdTe, nebo CuIn(Ga)Se<sub>2</sub>, které se účinností přibližují článkům první generace [8].

Třetí generaci fotovoltaických článků představují nekřemíkové technologie. V hlavní míře se využívají kompozitní materiály, které dokáží využít větší část slunečního spektra a generují tak více elektrické energie. Do třetí generace neodmyslitelně patří vícevrstevné či více přechodové články, kde každá vrstva slouží k absorpci a přeměně určité části slunečního spektra. Každá vrstva má svůj přechod, a proto se někdy nazývají více přechodové. Takovéto uspořádání vede k razantnímu zvýšení účinnosti, avšak je finančně náročnější než články předešlé generace [8].

### **2.2.3 Odrazivost a propustnost**

Uvažujeme-li ideální svět, tak veškeré dopadající fotony ze slunečního záření, jež dopadají na fotovoltaický modul, dopadají právě na jeho aktivní části, které jsou schopny přeměnit jejich energii na energii elektrickou. Jelikož se však

nenacházíme v ideálním světě, záření dopadající na fotovoltaický modul se odráží od vrchní vrstvy modulu. Pakliže uvažujeme tenkovrstvé PV moduly, tak nesmíme opomenout možnost pronikání světla skrze PV článek. Odrazivost je vlastnost popisující optické chování materiálu a definuje poměr mezi množstvím dopadajícího a odraženého záření. Propustnost zařízení je materiálová vlastnost definující kolik záření daným materiélem projde skrz. Propustnost lze rozdělit na difuzní a normálovou složku. Pro měření lze využít tzv. Ulbrichtovu kouli (kulový integrátor), která je uvnitř potažena reflexním materiélem, díky kterému vytvoříme difuzní prostředí pro světlo. Její princip funkce je znázorněn na obrázku 7 [2].



Obrázek 7 - Ulbrichtova koule [9]

#### 2.2.4 V-A charakteristika

Udává základní vlastnosti fotovoltaického článku. Jedná se o závislost proudu na napětí, jehož průběh je patrný na obrázku 8 [10].

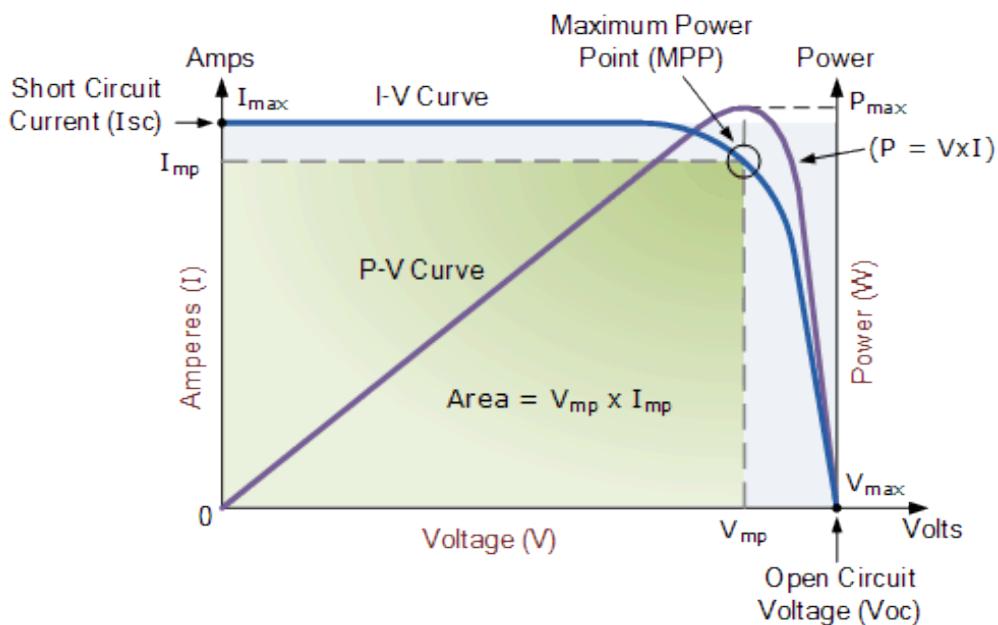
Významné body charakteristiky:

- Napětí naprázdno  $U_{OC}$  [V] – napětí pro  $I = 0$  A
- Proud nakrátko  $I_{SC}$  [A] – proud pro  $U = 0$  V
- Maximální výkon  $P_{MAX}$  [W] – maximální dosažitelný výkon článku  
 $P_{MAX}=I_{mp} \cdot U_{mp}$
- Účinnost  $\eta$  [%] – poměr výkonu generovaného článkem a vstupní energie dopadající ze Slunce
- Faktor plnění FF (Fill Factor) – určuje kvalitu solárních článků [10]

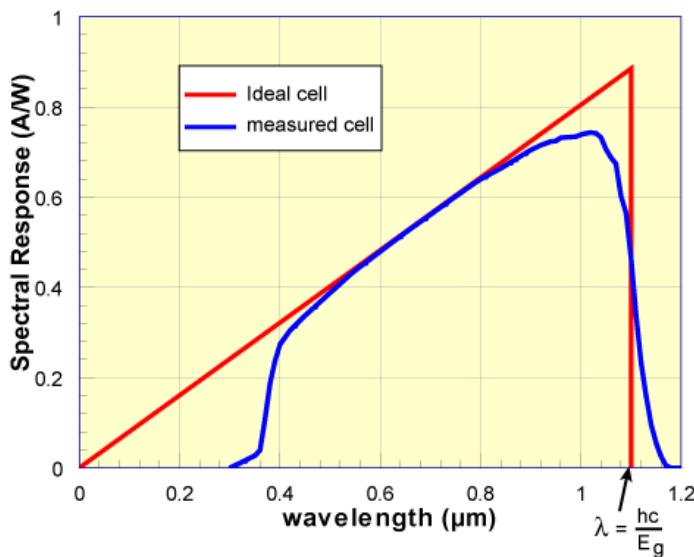
$$FF = \frac{U_{mp} I_{mp}}{U_{OC} I_{SC}} \quad (5)$$

## 2.2.5 Spektrální odezva

Spektrální odezva je charakteristická pro každý jednotlivý článek a je definována jako poměr vygenerovaného proudu fotovoltaickým článek a výkonu dopadajícího na článek. Jedná se o analogii kvantové účinnosti, která je definována jako poměr dopadajících elektronů a počtu elektronů na výstupu z fotovoltaického modulu [6].



Obrázek 8 - V-A charakteristika fotovoltaického článku [11]



Obrázek 9 - Porovnání měřené a ideální odezvy PVE článku [12]

Na obrázku 9 je možné pozorovat rozdíly v měření spektrální odpovědi proti ideálnímu křemíkovému článu pod ochranným sklem. Oproti ideálnímu průběhu dochází k razantnímu poklesu pod 400 nm, neboť dochází k absorpci světla vrstvou ochranného skla. Pro vyšší vlnové délky je možné pozorovat rekombinaci na zadní straně článku, která pro ideální průběh je omezena neschopností absorbovat elektrony s energií vyšší než zakázané pásmo. Velikost zakázaného

pásu křemíku odpovídá za pokojové teploty hodnotě 1,12 eV. Tato hodnota je stejná, kterou lze pozorovat u křivek kvantové účinnosti. Zatímco u kvantové účinnosti je možné pozorovat čtvercové křivky, tak pro spektrální odezvu klesá reakce pro fotony nízkých vlnových délek. Jelikož pro tyto vlnové délky mají fotony velikou energii, tak dochází ke snížení počtu fotonů pro stejný výkon. Veškerou energie nad hranicí zakázaného pásu tedy nelze využít PV článkem a tato energie se přeměňuje na tepelnou energii, která zahřívá PV článek a snižuje jeho účinnost. Energie nad hranicí zakázaného pásu tvoří nemalou složku energie potenciálně získatelné ze slunečního záření, kterou lze považovat za ztráty fotovoltaického článku stejně tak jako neschopnost článku absorbovat krátké vlnové délky [6].

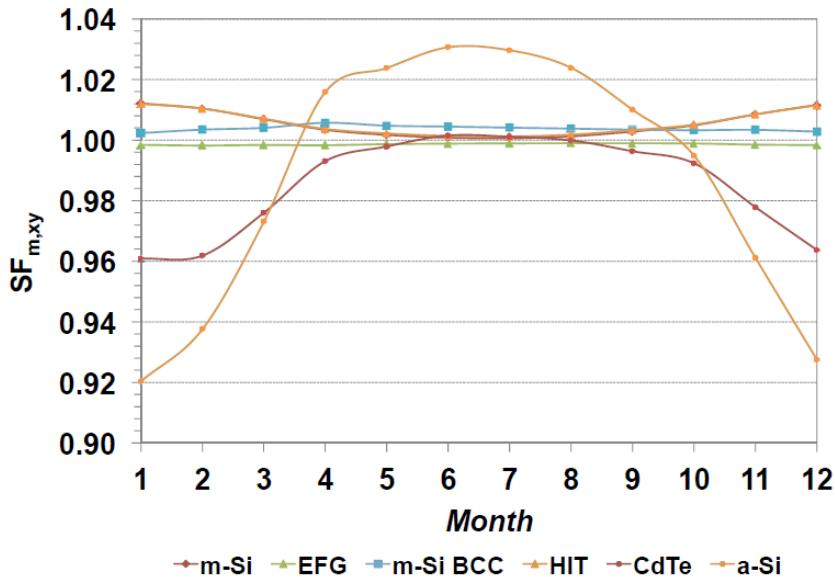
Hlavním důvodem měření spektrální odezvy je její využití při výpočtu kvantové účinnosti, kterou lze vypočítat z odezvy nahrazením intenzity světla na určité vlnové délce proudem fotonů s odpovídající energií pro danou vlnovou délku [6].

$$SR = \frac{q\lambda}{hc} QE \quad (6)$$

*SR* spektrální odezva (spectral response)

*QE* kvantová účinnost (quantum efficiency)

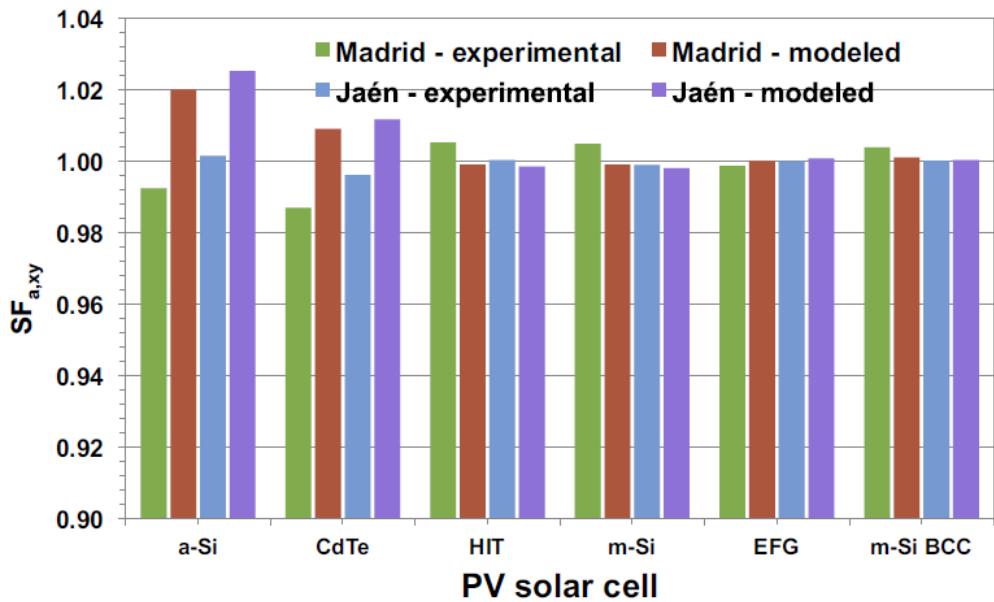
Důsledek rozdílné spektrální odezvy je patrný i na reálných PV modulech, jak je patrné z publikovaných studií, např. v letech 2013 a 2014 byl proveden výzkum společnostmi CIEMAT/DER sídlící v Madridu a IDEA Research Group sídlící na Univerzitě v Jaén. Cílem této studie bylo zkoumání spektrální odezvy osmi různých fotovoltaických modulů. Pro výzkum byly použity moduly monokrystalického křemíku (m-Si), polykrystalického křemíku (p-Si), páskového křemíku (EFG), monokrystalického křemíku se zadním kontaktem (m-Si BCC), více přechodový článek s přídavnou tenkou vrstvou (HIT), CIS (Měď, Indium, Selen), tenkovrstvé CdTe a amorfní křemík (a-Si), které byly nainstalovány jak v Madridu, tak v Jaén. Tato města se liší svojí zeměpisnou polohou, neboť Jaén leží 300 km jižně od Madridu. Třetím místem instalace pak byl Stuttgart, který se nachází severněji a průměrná teplota je zde nižší než ve Španělsku. Rozdílná zeměpisná šířka byla vybrána úmyslně z důvodu zkoumání jejího vlivu na účinnost jednotlivých typů modulů. Moduly byly nainstalovány po dobu 12 měsíců a data z jednotlivých vzorků byla pravidelně zaznamenávána [13].



Obrázek 10 - Naměřené hodnoty  $SF_{m,xy}$  pro články instalované v Madridu [13]

Nehledě na místo instalace bylo zjištěno, že CdTe a moduly z amorfního křemíku vykazují největší odchylky mezi předpokládanými a změřenými hodnotami měsíčních zisků. Naproti tomu ostatní použité typy článků měly minimální odchylky. Porovnání odchylek v jednotlivých měsících pro různé technologie je zobrazeno na obrázku 10. Největší odchylka byla zaznamenána u modulu z amorfního křemíku instalovanému ve Stuttgartu, kde se v zimě pohybovala na hodnotě 16 % a 4 % v létě. Měřením bylo stanoveno, že vliv spektrální odezvy je přímo úměrné klesající zeměpisné šířce. Celkové odchylky od očekávaných hodnot lze snížit, pakliže nebude provedeno měsíční pozorování, ale pozorování celoroční. Prodloužením pozorovacího intervalu bylo dokázáno, že odchylka spektrálních zisků se drží pod 2,2 % proti očekávaným hodnotám nehledě na typ použitých fotovoltaických článků. Výsledky tohoto měření jsou znázorněny na obrázku 11 [13].

Výše popsaný výzkum popisuje vliv zeměpisné šířky na účinnost jednotlivých typů fotovoltaických článků z pohledu spektrální odezvy, avšak není v něm zohledněn vliv počasí, neboť moduly byly instalovány ve venkovním prostředí a výsledné hodnoty se mohou rok od roku lišit. Tento vliv by bylo možné eliminovat dlouhodobým zkoumáním společně se zavedením vlivu povětrnostních podmínek na degradaci fotovoltaických modulů.



Obrázek 11 - Naměřené a předpokládané hodnoty  $SF_{a,xy}$  pro články instalované v Madridu a Jaén [13]

### 2.2.6 Miss match factor – faktor spektrální neshody

Fotovoltaické moduly je možné porovnat v prvním přiblížení na základě naměřeného výkonu, ten je však určován nejčastěji při tzv. „umělému slunci“, tedy při simulaci slunečního záření v laboratořích. Při využití tohoto postupu dochází k odchylkám od kalibrovaného normovaného světla AM1.5, které bylo podrobně popsáno v kapitole 2.1.4. Díky této odchylce dochází k rozdílu v naměřených výsledcích, proto se zavádí faktor spektrální neshody (MM – miss match factor), který má za cíl potlačit tento nežádoucí jev při využití „umělého slunce“. Podle výše zmíněného je patrné, že faktor spektrální neshody je definován jako odchylka spektrálního výstupu měřeného fotovoltaického článku a referenčního článku. Dále tento faktor také ztělesňuje odchylku mezi spektrem světla, kterým je ozařován fotovoltaický článek a normovaným světlem AM1.5. Výsledný faktor je pak definován tímto vztahem:

$$MM = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_s(\lambda) R_t(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_3}^{\lambda_4} E_s(\lambda) R_r(\lambda) d\lambda} \times \frac{\int_{\lambda_3}^{\lambda_4} E_r(\lambda) R_r(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_r(\lambda) R_t(\lambda) d\lambda} \quad (7)$$

$E_s(\lambda)$  spektrální ozáření měřeným zdrojem

$E_r(\lambda)$  spektrální ozáření referenčního zdroje

$R_t(\lambda)$  spektrální odezva testovaného článku

$R_r(\lambda)$  spektrální odezva referenčního článku

Pro přesný výpočet je nutné stanovit vlnové délky  $\lambda$  tak, aby pokrývaly celou oblast citlivosti PV článku. Přepočet pomocí této metody bývá často zdlouhavý a komplikovaný, proto se zavádí korekční metoda faktoru spektrální metody

následujícím zjednodušeným vztahem, která platí v případě ozáření článku celou šírkou spektra. Vztah (8) je definován podle normy ČSN EN 90904-7 [10].

$$MM = \frac{I_{SC,ref,Eref} \cdot I_{SC,sample,Emeas}}{I_{SC,ref,Emeas} \cdot I_{SC,sample,Eref}} \quad (8)$$

$I_{SC,ref,Eref}$	hodnota zkratového proudu referenčního článku při AM1.5
$I_{SC,ref,Emeas}$	hodnota zkratového proudu referenčního článku pod měřeným spektrem
$I_{SC,sample,Eref}$	hodnota zkratového proudu měřeného článku při AM1.5
$I_{SC,sample,Emeas}$	hodnota zkratového proudu měřeného článku pod měřeným spektrem

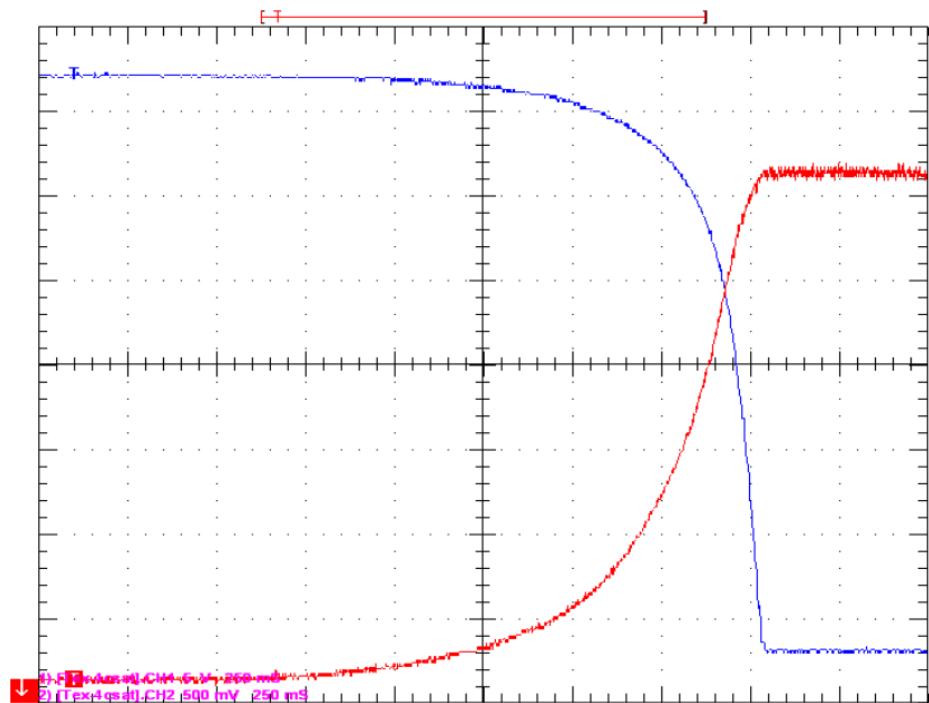
### 3 Měření spektrální citlivosti

Měření relativní spektrální citlivosti se provádí tak, že měřená PV součástka je ozařována pomocí zdroje světla o velice úzkém pásu vlnové délky. Postupným měřením na jednotlivých úzkých pásmech je pokryto celé pásmo citlivosti fotovoltaického článku a je možné tak stanovit hustotu proudu a míru ozáření pro každou vlnovou délku [10].

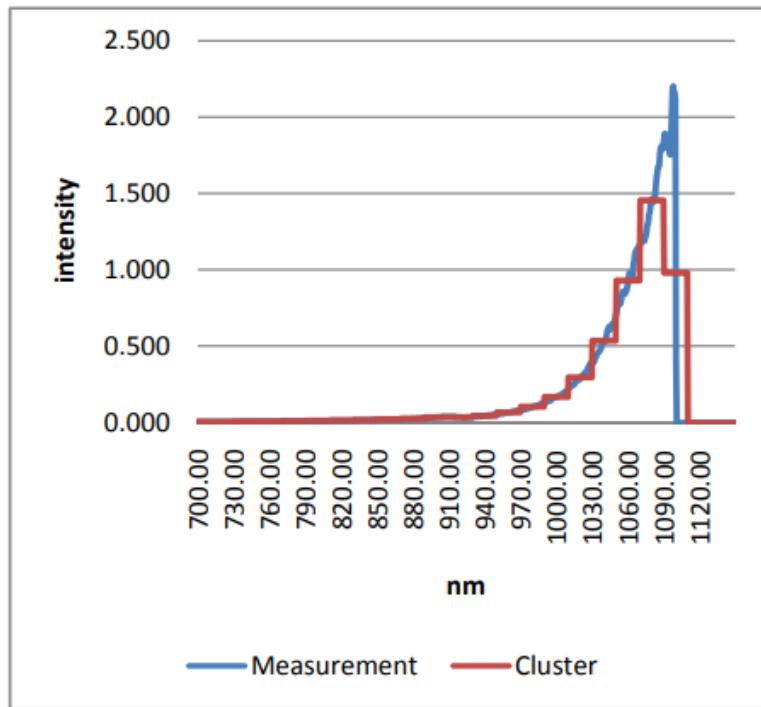
#### 3.1 Měření spektrální citlivosti na univerzitě Óbuda

V roce 2012 proběhl na maďarské univerzitě Óbuda výzkum měření účinnosti fotovoltaických modulů. Měření záření bylo prováděno spektrometrem StellarNet BLUE-Wave v rozmezí vlnové délky 350 nm – 1 150 nm s rozlišením 0,5 nm. Primárním cílem bylo stanovení maximálního výkonu dodávaného modulem a stanovení citlivosti modulu na určitou vlnovou délku. Výkon je stanoven pomocí známého vzorce  $P = U \cdot I$ , kdy je na osciloskopu snímáno napětí a proud. Výše popsaným způsobem lze zkoumat hodnotu výkonu v laboratorních podmínkách, kde není nutné změřit velké množství hodnot za krátký čas, avšak pro venkovní použití je tato metoda nevhodná. Hlavním důvodem navýšení počtu hodnot je změna ozáření. Tato hodnota není konstantní jako v laboratoři, ale mění se podle vnějších podmínek (jasné nebe, oblačno, východ slunce, poledne, západ slunce atd.). Pro zpracování tohoto objemu dat jsou k výstupu z modulu připojeny dvě sondy osciloskopu, kdy první snímá napětí a druhá proud. Na maďarské univerzitě použili osciloskop, který navzorkoval 2 500 hodnot každé dvě sekundy. Sejmuté průběhy svým tvarem odpovídají Lissajusově křivce, která je znázorněna na obrázku 12. Při měření spektrometrem StellarNet BLUE-Wave byla stanovena maximální intenzita při vlnové délce 1 090 nm. Celkový průběh intenzity je pak znázorněn na obrázku 13 [14].

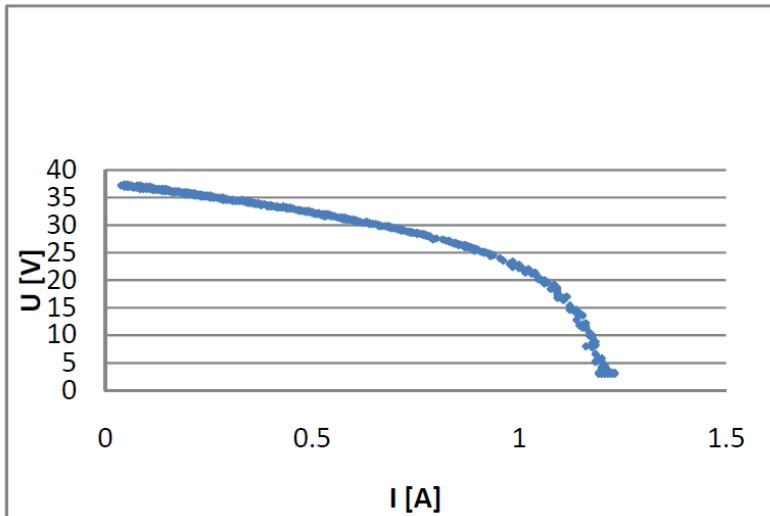
Pomocí výše představené metody se maďarským vědcům podařilo zdokumentovat V-A charakteristiku a výkonovou charakteristiku s přihlédnutím na nerovnoměrné podmínky ozáření modulu za použití znalostí spektrální analýzy.



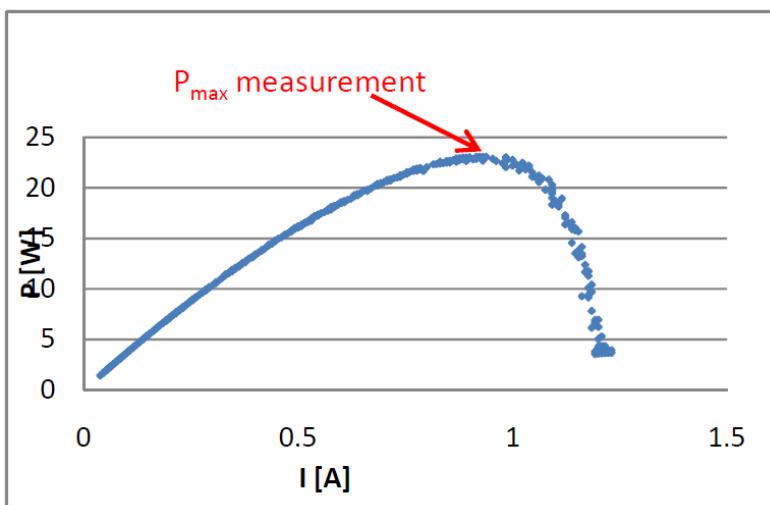
Obrázek 12 - Sejmuty průběh napětí a proudu [14]



Obrázek 13 - Závislost intenzity na vlnové délce [14]



Obrázek 14 - V-A charakteristika měřeného fotovoltaického modulu [14]

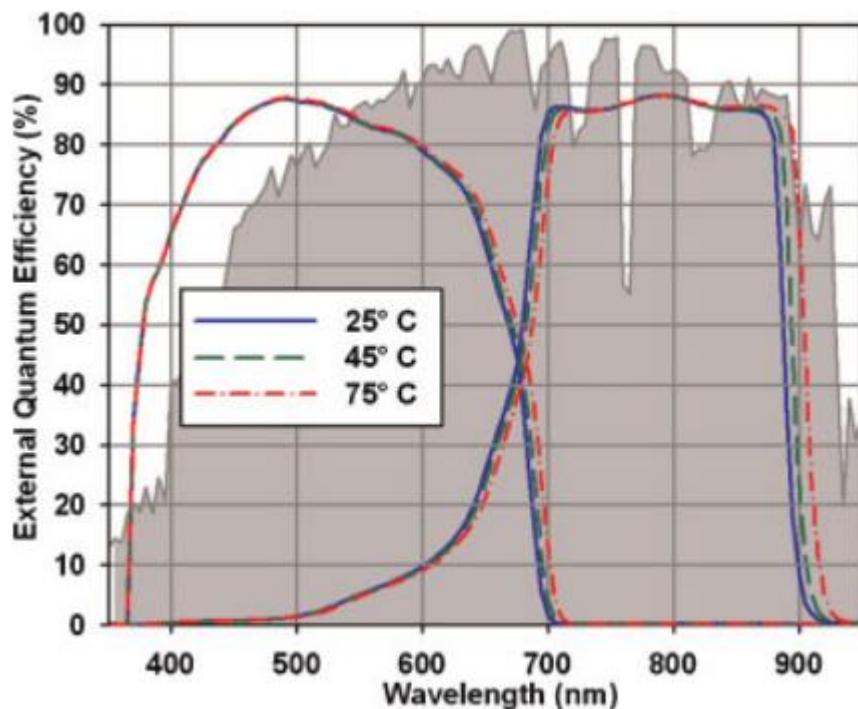


Obrázek 15 - Výkonová charakteristika měřeného modulu [14]

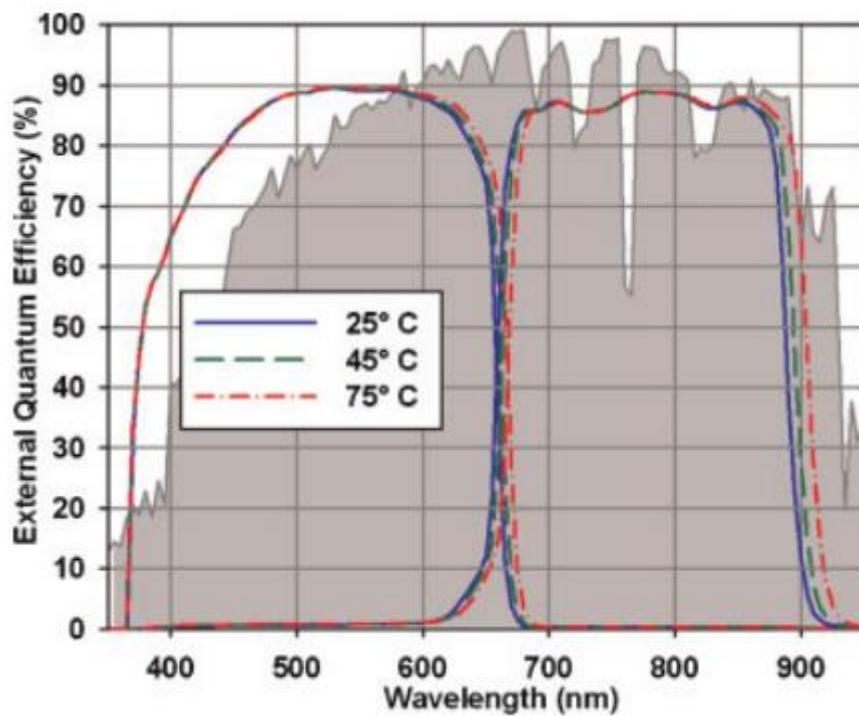
### 3.2 Měření spektrální citlivosti společnosti Amonix

V roce 2008 zkoumala americká společnost Amonix spektrální odezvu fotovoltaických vícepřechodových článků, konkrétně se třemi až pěti přechody. Cílem této studie bylo zkoumání spektrální odezvy pro předvídání účinnosti fotovoltaických vícepřechodových článků při využití spektra AM1.5 a naměřeného spektra v několika různých geografických lokalitách. Spektrální odezva jednotlivých článků byla měřena nejen při laboratorní teplotě 25°C, ale i při zvýšené teplotě až do 75°C. Důvodem měření při vyšší teplotě, než laboratorní, je snaha o získání dat odpovídajících reálným podmínkám, neboť fotovoltaické články se zabudovanou vysoko-koncentrační optickou soustavou pracují běžně při teplotách v rozmezí 40°C - 80°C. Se vzrůstající teplotou dochází k zužování šířky zakázaného pásu jednotlivých materiálů vícepřechodového článku, což vede k posunutí rozsahu absorbovaných vlnových délek a tím rozdílné spektrální odezvě oproti naměřené při laboratorní teplotě [1].

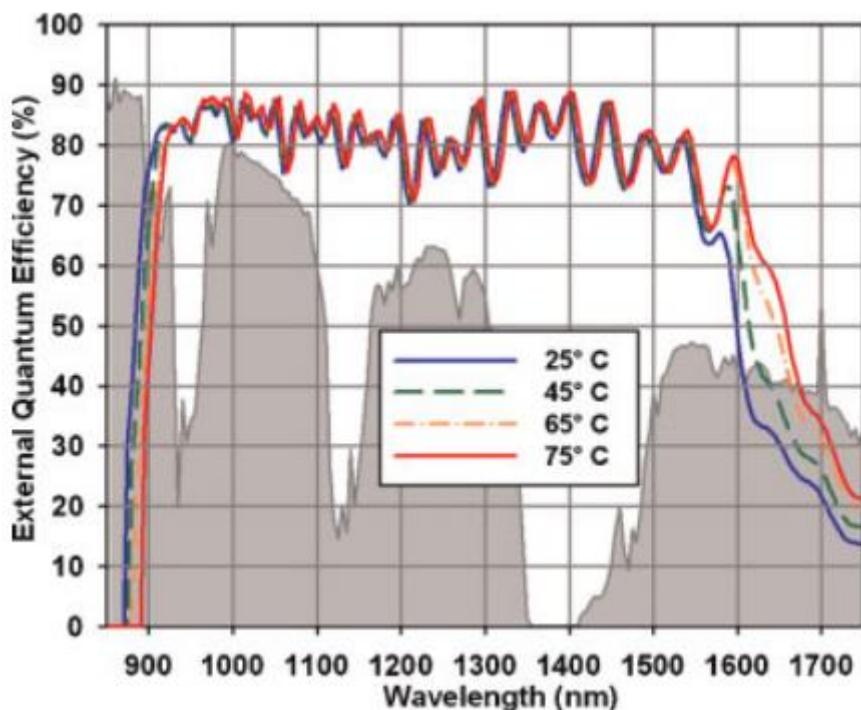
Samotné měření spektrální odezvy bylo prováděno jako funkce teploty. Měření byly podrobeny fotovoltaické články Spectrolab C1MJ („koncentrátorové vícepřechodové články první generace“) a články C2MJ (prototypy druhé generace). Články C1MJ se vyrábí již od roku 2006, prošly mnoha atesty a dnes jsou nainstalovány ve většině fotovoltaických koncentrátorových systémů po celém světě. Oproti tomu články C2MJ se v době výzkumu nacházely ve fázi prototypů a existoval nejeden návrh jejich konstrukce. Pro tento výzkum se společnost Amonix rozhodla využít články C2MJ, kde je vrchní vrstva navržena tak, aby šířka zakázaného pásu byla větší, což vede k vyššímu výstupnímu napětí než u článků první generace. Obě generace článků jsou osazeny antireflexní vrstvou, která je navržena společně s krycím sklem na index lomu 1,43. V rámci tohoto výzkumu byly články měřeny bez krycího skla s respektováním vlivu předpokládaných komponent optického systému (čočka, sklo, ...). Spektrální odezva byla měřena za použití wolfram-halogenového zdroje světla a monochromátoru s vysokým rozlišením, který dodával záření nízké intenzity. V rámci měření bylo vyzářeno celé spektrum vlnových délek s krokem 5nm na malou plochu, kterou byl  $1 \text{ cm}^2$  koncentrátorového článku. Pro otestování jednotlivých sub-článků byl dopadající paprsek rozdelen a výsledný výstupní proud byl snímán pomocí blokového zesilovače. Aby nebyl proud během testu omezen ostatními sub-články, byla použita kontinuální světelná složka o velikosti zajišťující otevření jednotlivých sub-článků. Pro udržení konstantní teploty během měření byly články umístěny ve vakuu na mosazném držáku (úchopu), který byl ochlazován/vyhříván pro udržení konstantní teploty články v průběhu měření. Teplota článku byla snímána termočlánkem osazeným vedle měřeného článku. Pro měření vrchního a středního sub-článku byl využit standardní monokrystalický křemíkový článek a pro spodní sub-článek byl použit germaniový referenční článek pro dosažení odpovídajících hodnot. Měření jednotlivých článků bylo opakovaně prováděno při teplotách 25, 45, 65 a 75°C. Naměřené spektrální citlivosti pro jednotlivé teploty vrchních dvou sub-článků vícepřechodového článku C1MJ jsou vyneseny v obrázku 16 a pro prototypy článků C2MJ na obrázku 17 [15].



Obrázek 16 - Spektrální odezva vrchního a středního sub-článku vícepřechodového článku C1MJ při teplotách 25, 45 a 75°C [15]



Obrázek 17 - Spektrální odezva vrchního a středního sub-článku vícepřechodového prototypu článku C2MJ při teplotách 25, 45 a 75°C [15]



Obrázek 18 - Spektrální odezva germaniového sub-článku vícepřechodového článku C 1MJ při teplotách 25, 45 a 75°C [15]

Naměřené hodnoty pro germaniový sub-článek, který se nachází ve spodní vrstvě heteročlánku, jsou vyneseny na obrázku 18, z něhož je nejvíce patrné zužování šířky zakázaného pásu se vzrůstající teplotou, které má za následek posun spektrální odezvy do vyšších vlnových délek [15].

Výše popsaná metoda představuje zkoumání vlivu teploty na spektrální odezvu více přechodových C1MJ a C2MJ článků pomocí monochromátoru a wolfram-halogenového zdroje světla. V rámci výzkumu se potvrdil předpoklad zúžení šířky zakázaného pásu a posuv do vyšších vlnových délek se zvyšující se teplotou, tj. očekávaný nárůst koeficientu  $J_T/J_M$ .

### 3.3 Možnosti měření spektrální citlivosti

Z výše uvedených výzkumů je patrné, že pro měření spektrální citlivosti se využívají spektrální filtry a monochromátor.

#### 3.3.1 Spektrální filtry

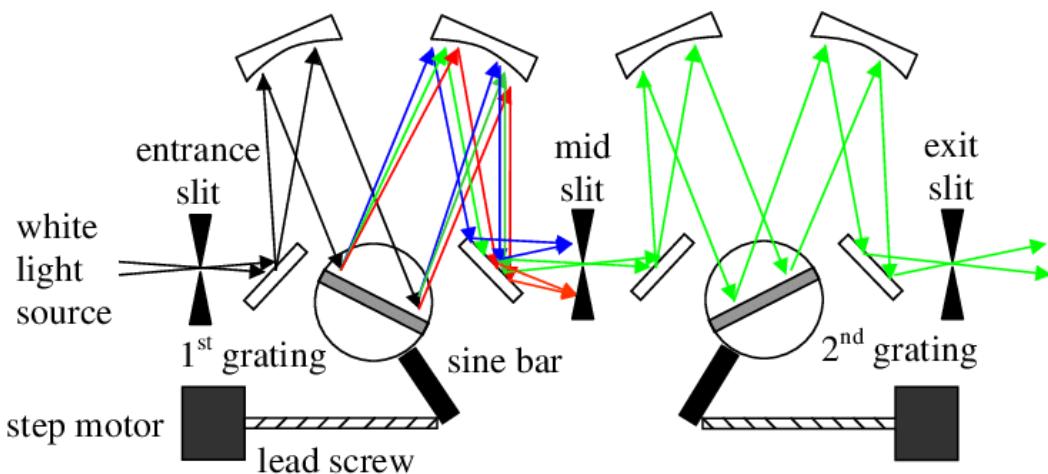
Spektrální citlivost lze měřit při použití zdroje světla a jednotlivých barevných filtrů, pomocí kterých lze nastavit požadovanou vlnovou délku. V optice je rozlišováno 6 základních typů filtrů podle spektrálních vlastností. Jsou to filtry hranové, propouštějící pásmové, zadržující pásmové, konverzní, speciální a neselektivní filtry. Hranové filtry jsou typické vysokou propustností pro dlouhovlnnou oblast a od jisté vlnové délky dochází k ostrému přechodu a pohlcení kratších vlnových délek. Propouštějící pásmové filtry, jak již název napovídá, propouští světlo v úzkém pásmu vlnové délky a na obě strany od tohoto pásu je světlo pohlceno.

Zadržovací pásmové filtry jsou přesným opakem propouštěcích pásmových filtrů. Jejich cílem je vyfiltrování určitého pásmá vlnové délky a propuštění zbytku spektra a používají se např. pro eliminaci UV záření. Konverzní filtry jsou charakteristické pozvolným vzestupem (načervenalost), popř. poklesem (namodralé zabarvení) vlnové délky. Speciální filtry se využívají s nerovnoměrnými spektry, časté lokální extrémy, které mají za cíl selektivně odfiltrovat. Ze spektra tak lze např. odfiltrovat zdroj umělého záření. Posledním typem jsou tzv. neselektivní filtry, které jsou také nazývány šedé, popř. neutrální. Jejich cílem je pohlcení nadbytku světla bez ovlivnění rozložení spektra [16].

Z výše popsánoho využití filtrů je patrné, že tato metoda je finančně i časově nákladná, jelikož je nutné pro stanovení libovolné vlnové délky zakoupit nejeden filtr. S rostoucí variabilitou, tj. filtrace více vlnových délek vzniká nejen cena, ale i časová náročnost, která se projevuje zejména při častějším střídání požadované vlnové délky, kdy je nutné vyměnit jednotlivé filtry.

### 3.3.2 Monochromátor

Druhou možností měření je využití monochromátoru, což je zařízení, které na svém výstupu propouští jen malou část spektra, jehož vlnovou délku je možné měnit. Základní blokové schéma monochromátoru je znázorněno na obrázku 10. Monochromátor se skládá ze zdroje světla, jehož emitované záření prochází vstupní štěrbinou do celé soustavy monochromátoru. Samotný monochromátor tvoří soustava zrcadel a optická mřížka, kterou je možné natočit dle potřeby pomocí krokového motoru. Vstupní štěrbina usměrní tok světla na soustavu zrcadel a hranolů, které mají za cíl rozdělit bílé světlo podle jednotlivých vlnových délek díky principu Fresnelova ohybu světla. Po získání požadovaného spektra světla prochází světlo ven střední štěrbinou, která může ve zjednodušených monochromátorech být výstupní štěrbinou. Vstupní štěrbina také udává šířku záření, které vstupuje do monochromátoru. Druhá část monochromátoru, která je identická s první polovinou, poté snižuje rozptylové záření a je nastavena tak, aby bylo na výstupu emitováno záření požadované vlnové délky [17].



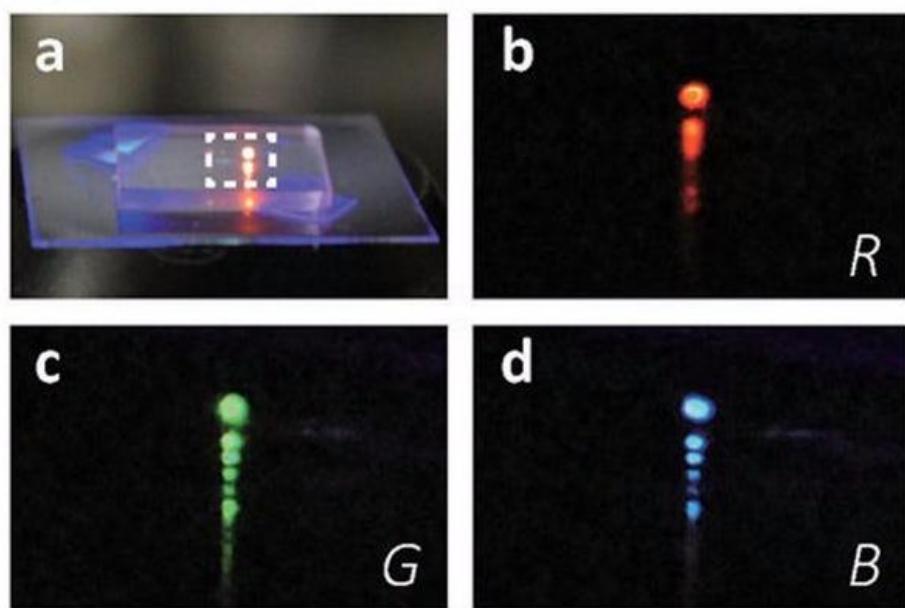
Obrázek 19 - Schéma monochromátoru [17]

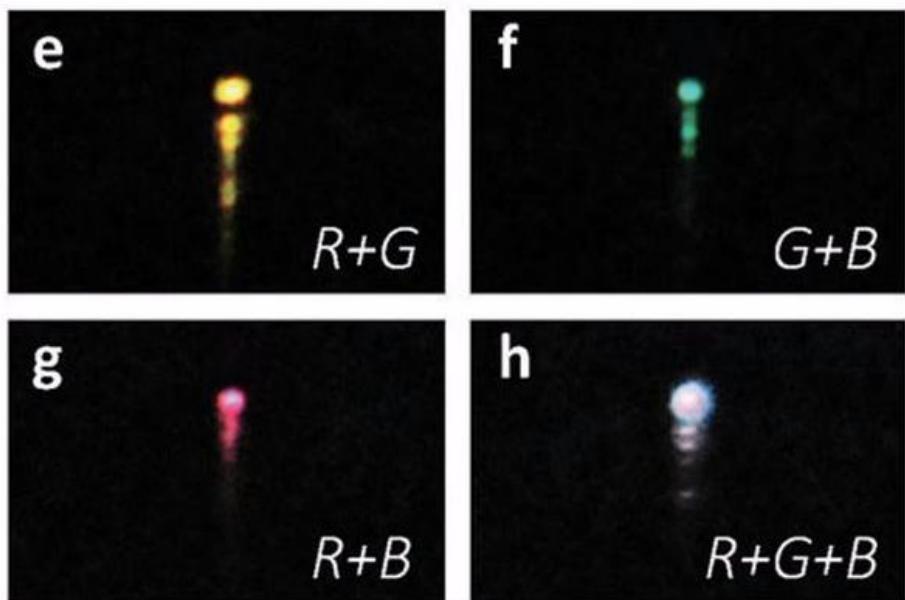
I metoda využití monochromátoru je stejně jako využití filtrů finančně nákladná, neboť pořizovací cena monochromátoru se pohybuje v cenách tisíců dolarů. I když je monochromátor ovládán počítačem, tak k jeho hlavní nevýhodě patří nízký výstupní výkon záření dané vlnové délky.

### 3.3.3 Kontinuum laser

Další možností, která dosud není využívána a je předmětem této práce, je využití kontinuum laseru. Pro testování fotovoltaických článků je nezbytné normované spektrum AM1,5, kterým lze nejlépe napodobit vnější podmínky v místě budoucí instalace fotovoltaických článků. Spektrum AM1,5 obsahuje celé spektrum barev a navenek se pro lidské oko tváří jako bílá barva. „Bílé“ kontinuum laser, kterým je simulováno spektrum AM1,5 v laboratorních podmínkách, patří k nejmodernějším vysokovýkonným laserům, které nabízí nejen tzv. „rychlé zahřátí“ (nárůst teploty až do dosažení maximálního výkonu), ale i první kvalitu paprsku společně se stabilitou polohování, což činí tento laser ideálním adeptem pro nejnáročnější vědecké aplikace. Výsledkem je emitovaný koherentní paprsek, kterým lze ozařovat testovaný článek s požadovanou přesností vlnové délky bez využití monochromátoru či optických filtrů.

Tento typ laseru se od klasických barevných laserů liší, neboť neemituje přímo požadovanou barvu jako je tomu u běžných laserů (červený, modrý, zelený), avšak v rámci své konstrukce obsahuje 3 samostatné lasery. Ty vytváří 3 základní složky bílého světla, kterými jsou RGB (R – Red, G – Green, B – Blue). Každý z paprsků je emitován v útrobách celé konstrukce bílého laseru samostatně a na výstupu jsou všechny 3 paprsky složeny do jednoho paprsku bílého světla pomocí optické čočky [18]. Laser je ovládán počítačem, na kterém je možné přesně nastavit požadovanou vlnovou délku pro jednotlivá měření.





Obrázek 20 - Skládání barev RGB spektra pomocí jednotlivých laserů [18]

Hlavní předností laseru, který je v této práci využit, je výstup záření z optického vlákna, kterým lze díky malým rozměrům a hmotnosti pohybovat dokonce po celém modulu a proměřit všechny články fotovoltaického modulu.

### 3.4 Závěr

V rámci této práce je využit místo filtrů, nebo monochromátoru kontinuum laser jako zdroj záření. Jelikož se v rámci této práce předpokládá měření pouze jedno přechodových článků, odpadá nutnost využití druhého externího zdroje záření, který by zajistil otevření ostatních sub-článků ve struktuře, aby nedocházelo tak k omezování proudu protékaného článkem. Při porovnání jednotlivých výše uvedených metod s metodou měření navrhovanou v této práci je patrné, že k hlavní přednosti navrhované metody je možnost zkoumání homogenit jednotlivých článků. Díky zcela odlišné konstrukci od monochromátoru umožňuje kontinuum laser vysokou variabilitu při ozařování objektu – není nutné umístit objekt před zdroj světla, zdrojem je možné pohybovat. Zatímco měření s využitím monochromátoru vyžaduje relativně malé vzorky, u použití kontinuum laseru tak může být ozařovaný objekt prakticky libovolných rozměrů. Měření je navíc možné automatizovat a proměřit článek, respektive modul v libovolných bodech s pomocí posuvů. Malá časová náročnost měření umožňuje nejen proměření velkého množství bodů, ale také opakovatelnost měření, neboť automatizované pojedy dokáží dosáhnout požadovaného bodu s přesností na desetinu milimetru.

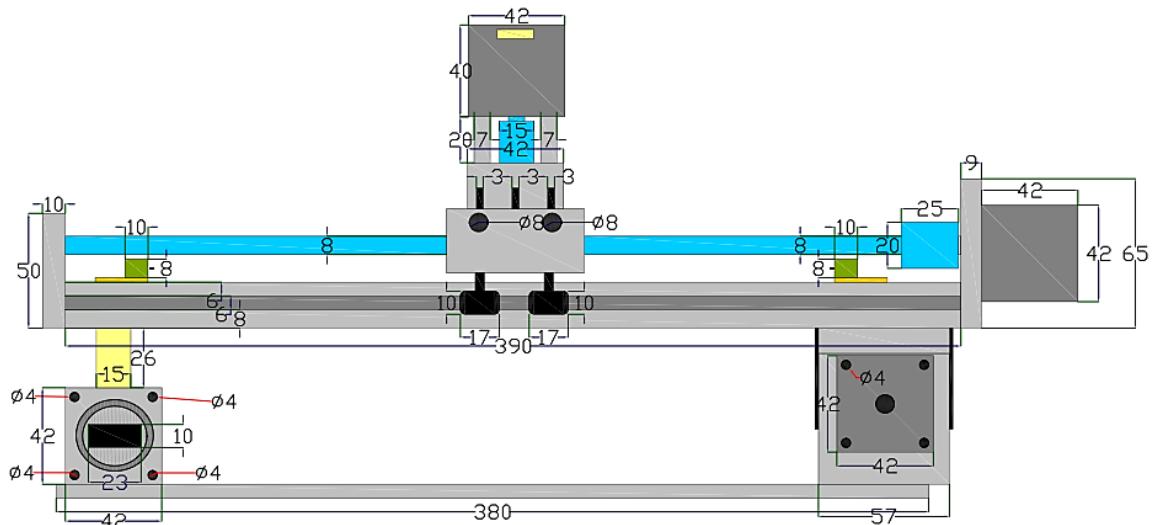
## 4 Měřicí přípravek

### 4.1 Konstrukční popis

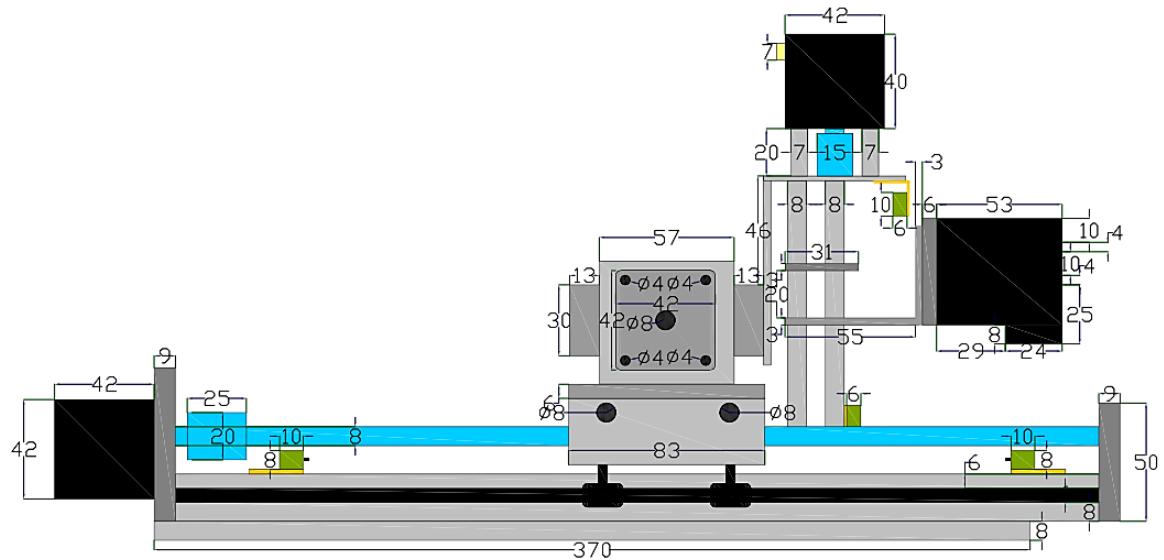
#### 4.1.1 Základní stavební prvky

V práci je řešen návrh zařízení, které pro měření spektrální citlivosti článků bude využívat kontinuum laser. Pro měření nehomogenit jednotlivých článků je nezbytné pohybovat laserem nad samotným fotovoltaickým článkem. Z tohoto důvodu je paprsek z laseru veden světlovodem (optické vlákno), jehož konec je umístěn v držáku. Tento držák je připevněn ke zbytku celého pohybového mechanismu.

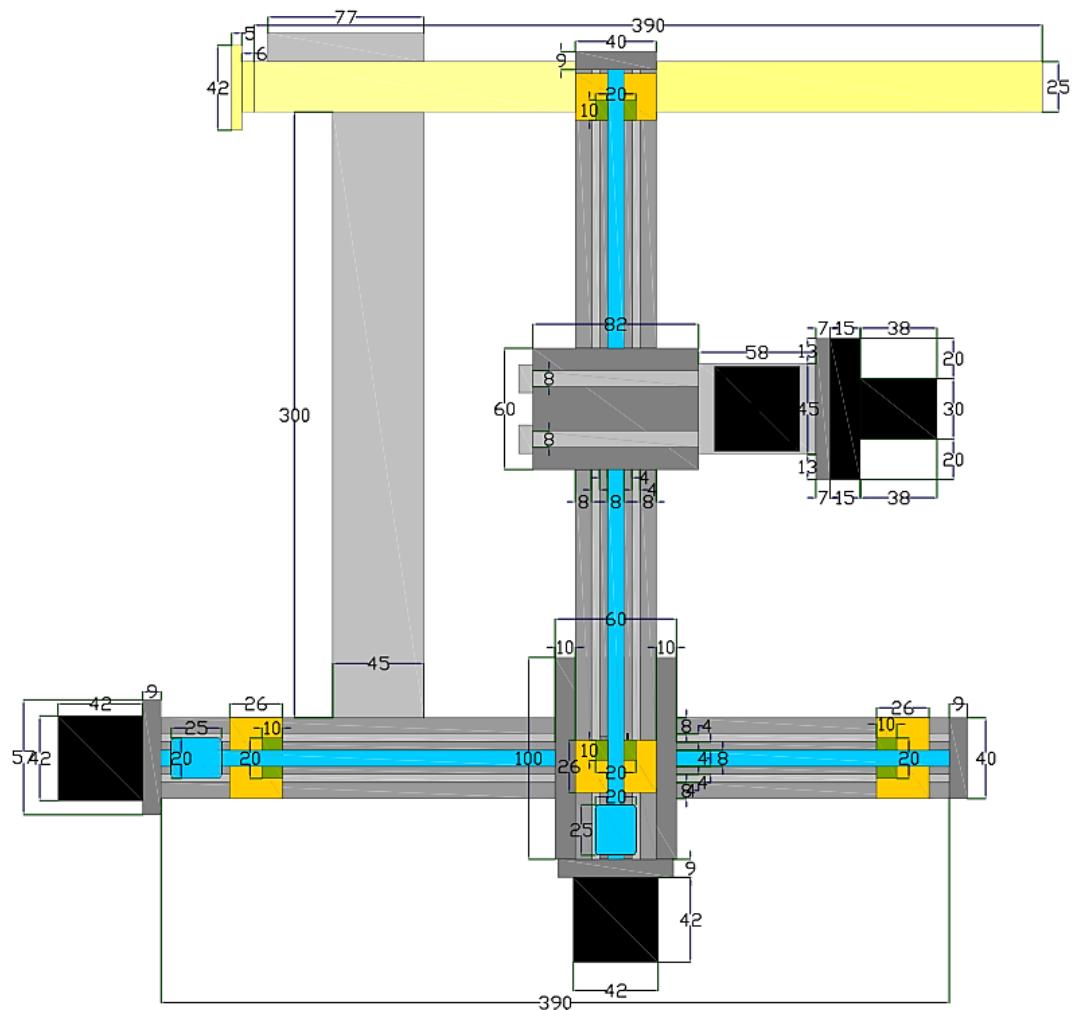
Měřící aparatura je složena z laserové hlavice a ze tří krokových motorů zajišťujících pohyb laserové hlavice v osách X, Y a Z. Pro osy X a Y jsou využity bipolární krokové motory NEMA 17, které mají pomocí spojky na ose hřídele připevněnou závitovou tyč délky 300 mm. Ta je na druhé straně uchycena v kuličkovém ložisku umístěném do rámu, ke kterému je připevněn i krokový motor. Na závitové tyči se nachází „vozíček“, na který je připevněn druhý identický rám s krokovým motorem a závitovou tyčí. Konstrukce je zobrazena na obrázcích 21, 22 a 23. Tímto sestavením je zajištěn pohyb v osách X a Y. Pohyb v ose Z zajišťuje třetí krokový motor, ke kterému je připevněna hlavice laseru se světlovodem.



Obrázek 21 - Měřící aparatura – pohled zleva



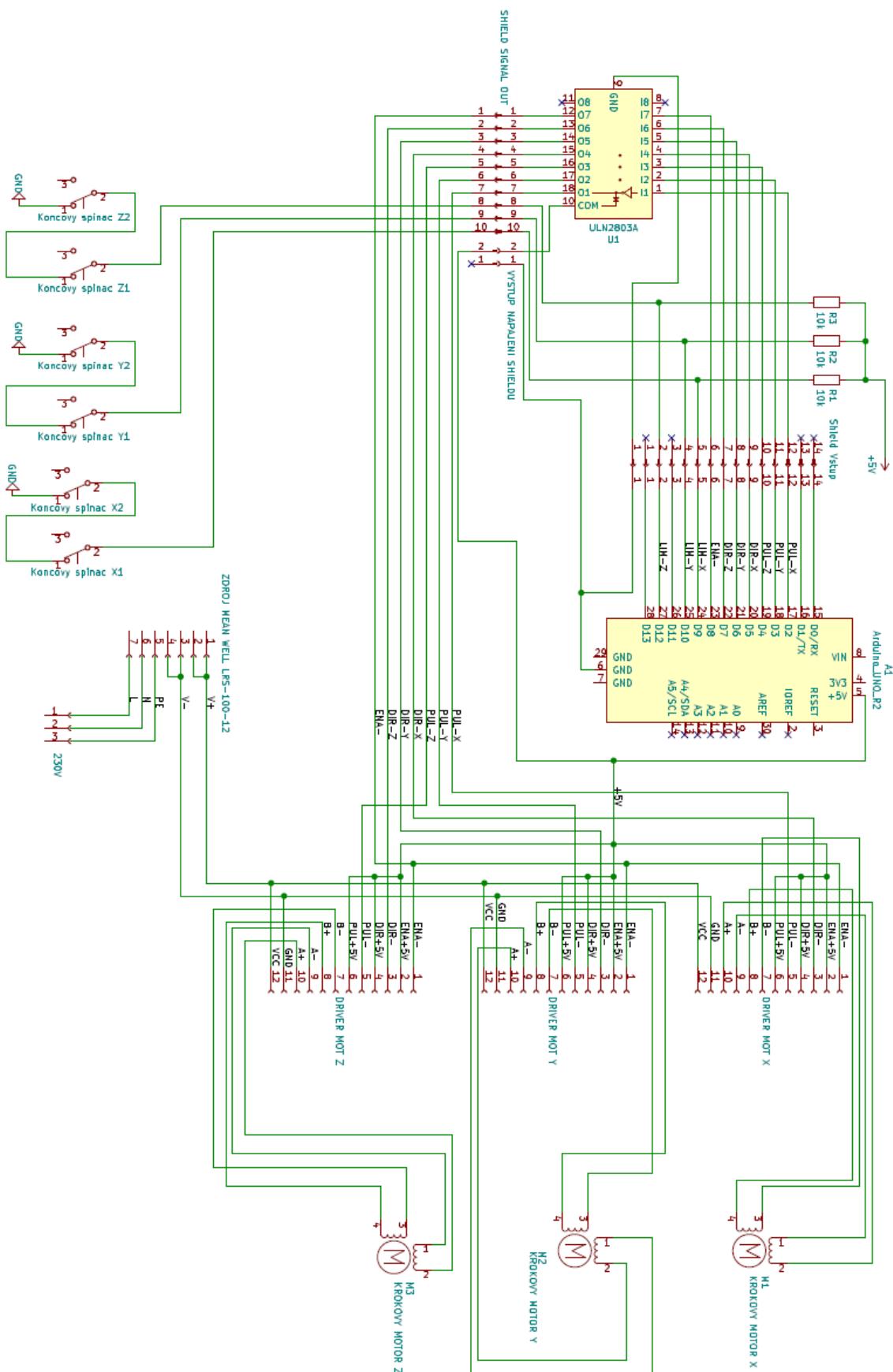
### Obrázek 22 - Měřící aparatura – pohled zepředu



Obrázek 23 - Měřící aparatura – pohled shora

#### 4.1.2 Pohybový mechanismus

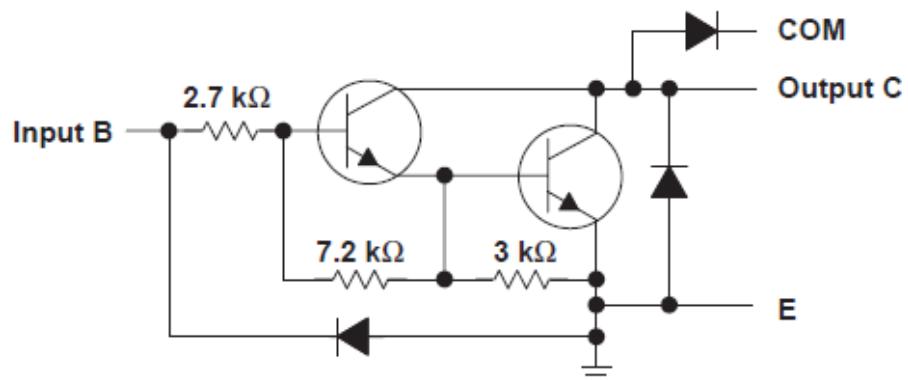
Osy X a Y zprostředkovávají pohyb nad samotným článkem a osa Z udává vzdálenost laseru od článku, která je pracovně označena výškou zdvihu. Osy X a Y jsou poháněny bipolárními krokovými motory NEMA17, které mají krouticí moment 45 N.cm. Osa Z je také osazena bipolárním krokovým motorem se čtyřmi vývody (A+, A-, B+, B-), které jsou na druhé straně připojeny do driveru pro krokové motory 4A TB67S109AFTG. Toto propojení je znázorněno v rámci celého elektrického zapojení na obrázku 24. Každou jednotlivou osu obsluhuje jeden driver starající se o její plynulý chod. Všechny tři drivery jsou napájeny ze spínaného zdroje MEAN WELL LRS-100-12, který má rozsah výstupního napětí 10,2 V - 13,8 V a pro tuto práci je využita hladina napětí 12 V. Pro roztočení motoru je zapotřebí měnit polaritu napětí jednotlivých vinutí, což zajišťuje tranzistorové pole neboli H-můstek, který je osazen na shield desce. Připojení driverů k H-můstku je provedeno pomocí 10pinového konektoru, na který jsou přivedeny jednotlivé signály. Druhé spojení mezi shield deskou a jednotlivými drivery je 5V napájení, které je realizováno pomocí šroubovací svorky připájené k shield desce. 5V napájení i řídicí signály jsou na straně driverů přivedeny do šroubovací svorky, která je součástí vestavěného konektoru a je dodávána společně s driverem. Drivery mají na jedné ze stran zabudovanou šestici přepínačů, pomocí které je možné nastavit počet pulzů na otáčku, mikrokrokování a proudové omezení. Mikrokrokování je způsob, kterým lze dosáhnout u stejného motoru dvojnásobného počtu kroků na jednotlivou otáčku za využití kombinace jednofázového a dvoufázového buzení. Toto jsou základní parametry nezbytné pro správný chod krokového motoru, aniž by došlo k jeho poškození (např. proudové přetížení). Pro ochranu motorů před přetížením v případě dosažení krajní polohy je každá z os osazena koncovými mikrospínači P-B172C. Jedná se o 1-pólový mechanický ON-ON mikrospínač, který zajišťuje tzv. „tvrdý doraz“. Na každé ose jsou spínače zapojeny sériově a z bezpečnostního hlediska konstruovány tak, aby při jejich stlačení, popř. přerušení obvodu neočekávanou mechanickou závadou došlo k odstavení pohybového mechanismu a nedošlo tak k jeho poškození.



Obrázek 24 - Obvodové schéma

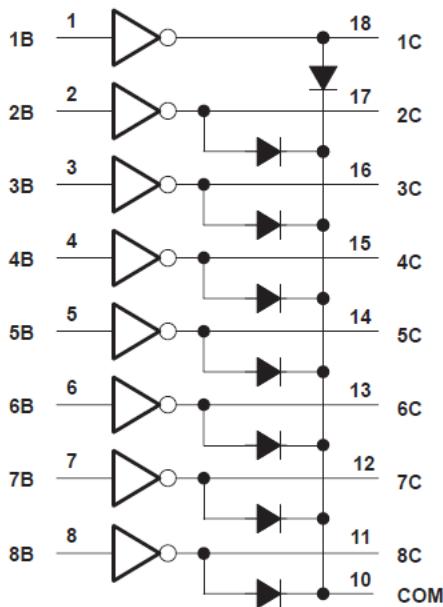
### 4.1.3 Logika řízení

Hlavním centrem starající se o chod celého pohybového aparátu je řídící deska Arduino UNO rozšířená o desku shield v5., na které jsou osazeny konektory a svorky nezbytné pro připojení k driverům a koncovým mikrospínačům. Na desce jsou také osazeny pull-up rezistory pro jednotlivé osy, přes které jsou signály z Arduina připojeny k hladině 5 V. V případě vybavení jednoho ze spínačů dochází k přerušení obvodu a proud se v tu chvíli uzavírá přes pull-up rezistory a dochází tak ke spojení hladiny 5 V s příslušným pinem Arduina a zastavení pohybu celého soustrojí. Arduino UNO má celkem 14 digitálních pinů, přičemž v této konstrukci je využito 10 z nich. Piny X, Y a Z jsou parametrizovány jako piny vstupní a slouží k detekci sepnutí předem popsaného mechanismu koncových spínačů. Ostatní piny jsou definovány jako výstupní a zajišťují posílaní příslušných signálů pro krokové motory. Hardwarově jsou piny desky Arduino UNO propojeny s deskou shield, na které jsou vedeny přes H-můstek ULN2803A a poté pokračují na výstupní konektor připojený k driverům. Samotný H-můstek ULN2803A se skládá z osmi tranzistorů v Darlingtonově zapojení s otevřeným kolektorem, přičemž každý z nich dokáže spínat proud až 500 mA při maximálním napětí 50 V, avšak napětí na vstupech nesmí překročit hodnotu 30 V. Zapojení jednoho můstku je znázorněno na obrázku 25.



Obrázek 25 - Schématické zapojení tranzistoru ULN2803A [19]

Zapojení na obrázku 25 se ve své podstatě chová jako invertor obsahující ochranné diody pro spínání induktivní zátěže, proto je možné celý obvod ULN2803A znázornit jako osmici invertorů, viz obrázek 26.



Obrázek 26 - Schéma logiky tranzistorového pole ULN2803A [19]

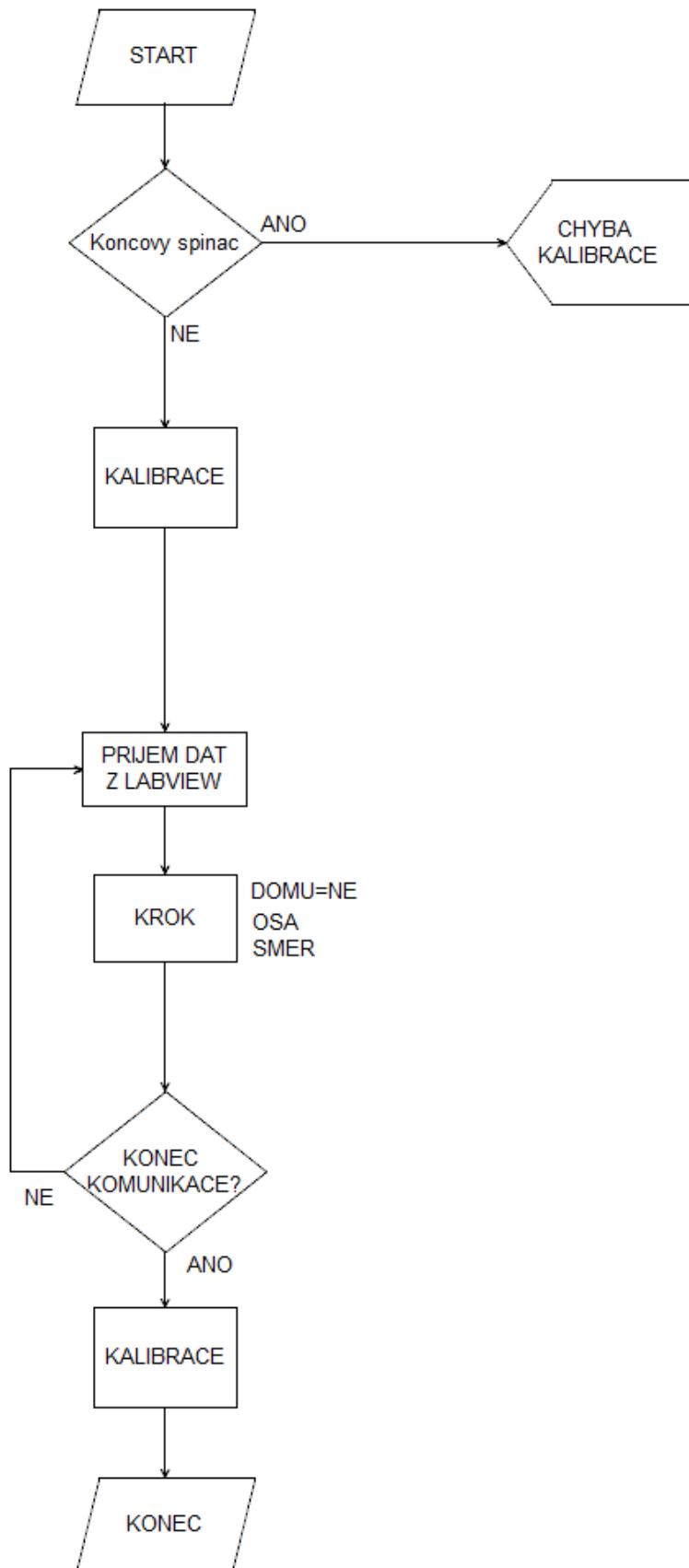
## 4.2 Softwarové řešení

### 4.2.1 Program Wiring

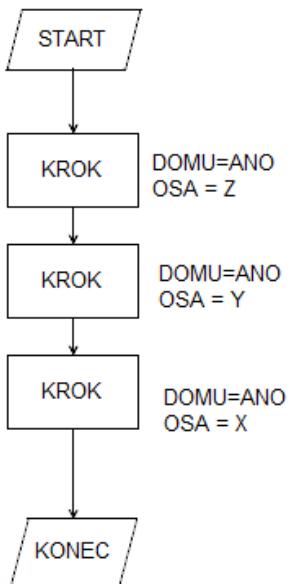
Jak bylo zmíněno v předchozí kapitole, hlavním srdcem celého řídicího softwaru je výpočetní jednotka Arduino UNO, do které je nahrán příslušný software. Arduino UNO se stejně jako ostatní desky Arduino programují jazykem Wiring, který je vytvořen pro programování mikrokontroléru bez nutnosti podrobné znalosti příslušného hardware. Programovací jazyk Wiring lze nejlépe syntaxem připodobnit jazyku C++. Hlavním rozdílem proti běžnému programování v C++ je struktura programu Wiring, který se dělí na dvě základní části. V prvé řadě je to setup, který se spustí na začátku při prvotním startu programu. Druhou hlavní částí je loop. Jedná se o automaticky volanou funkci „nekonečné“ smyčky, která probíhá, dokud je deska Arduino připojena k napájení.

V této práci se software nahraný do desky Arduino dělí na základní program *main.c* a 5 podprogramů, kterými jsou *couvani.c*, *kalibrace.c*, *posuv.c*, *serial.c*, *krok.c*.

Průběh hlavního programu *main.c* je popsán ve vývojovém diagramu na obrázku 27. Při spuštění tohoto programu dochází v prvé řadě k ověření, zda je sepnut některý z koncových mikrospínačů. Je-li spínač sepnut, tak program vyzve uživatele k zásahu, aby odpojil napájení a mechanicky pootočil osou tak, aby nebyl sepnut koncový spínač. V opačném případě, kdy není spínač sepnut, dochází k volání podprogramu *kalibrace.c*. Průběh tohoto podprogramu je znázorněn na obrázku 28. Tento podprogram má za cíl nastavení výchozích pozic jednotlivých os a definovat tuto polohu jako souřadnici  $[X,Y,Z] = [0,0,0]$ . Průběh *kalibrace.c* je definován jako volání podprogramu *krok.c*, a to třikrát za sebou, přičemž každé volání odpovídá nastavení jedné ze souřadnicových os.

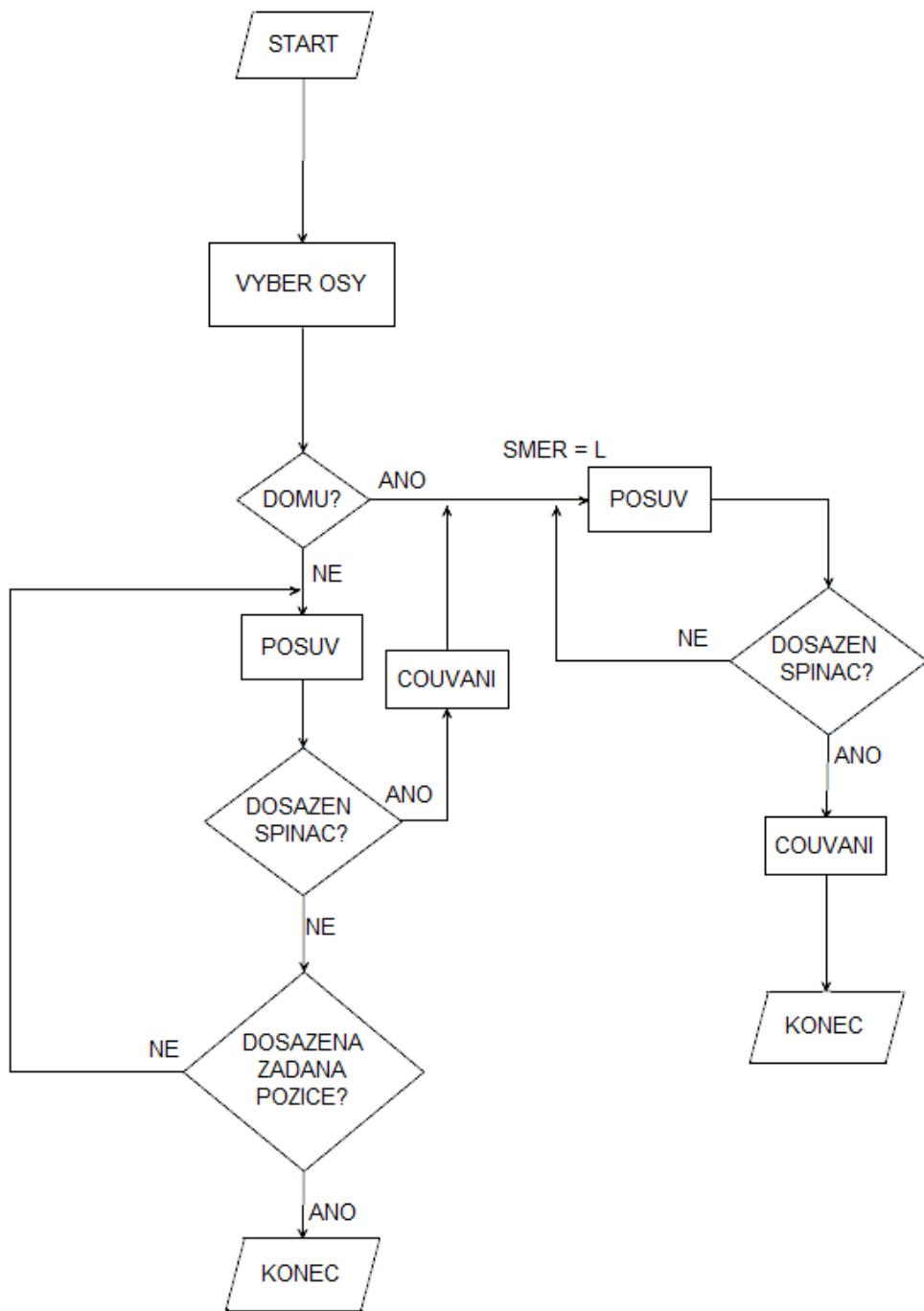


Obrázek 27 - Vývojový diagram hlavního programu main.c

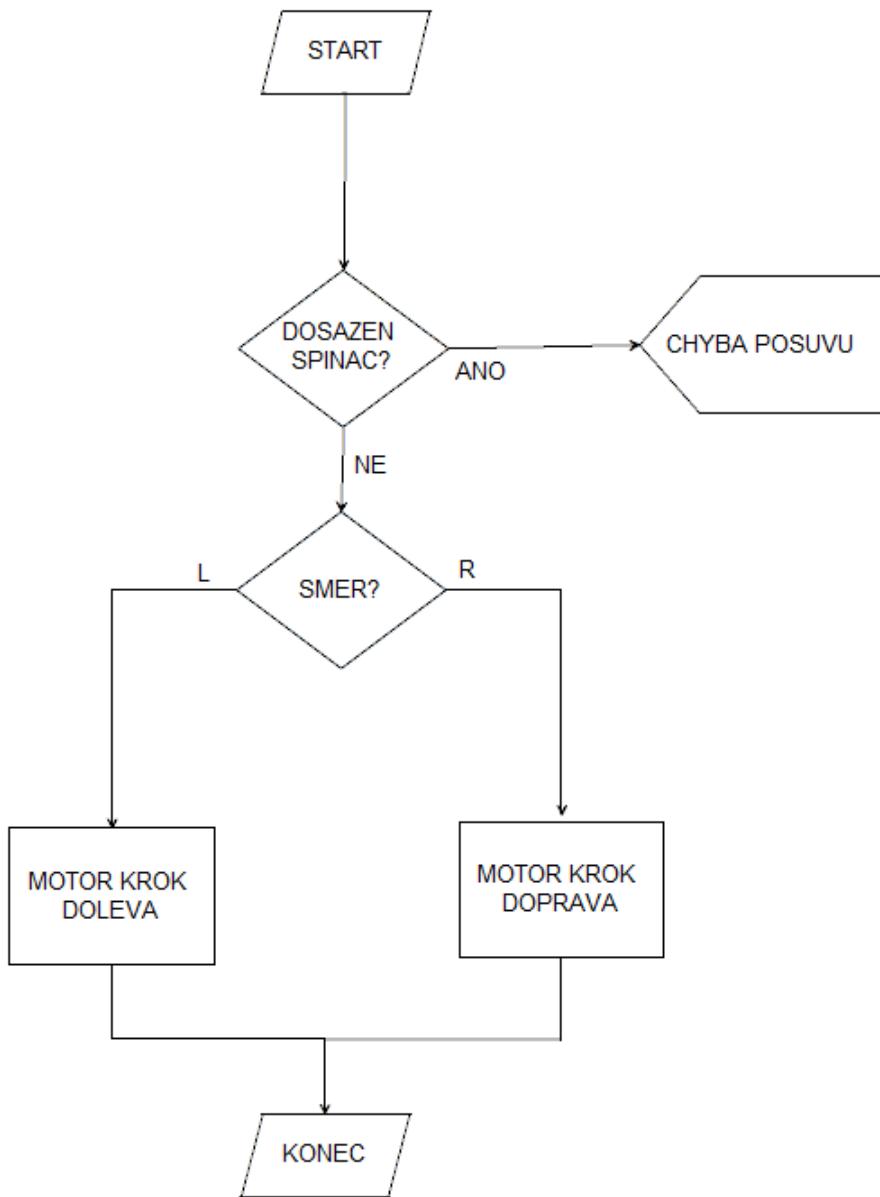


Obrázek 28 - Vývojový diagram podprogramu *kalibrace.c*

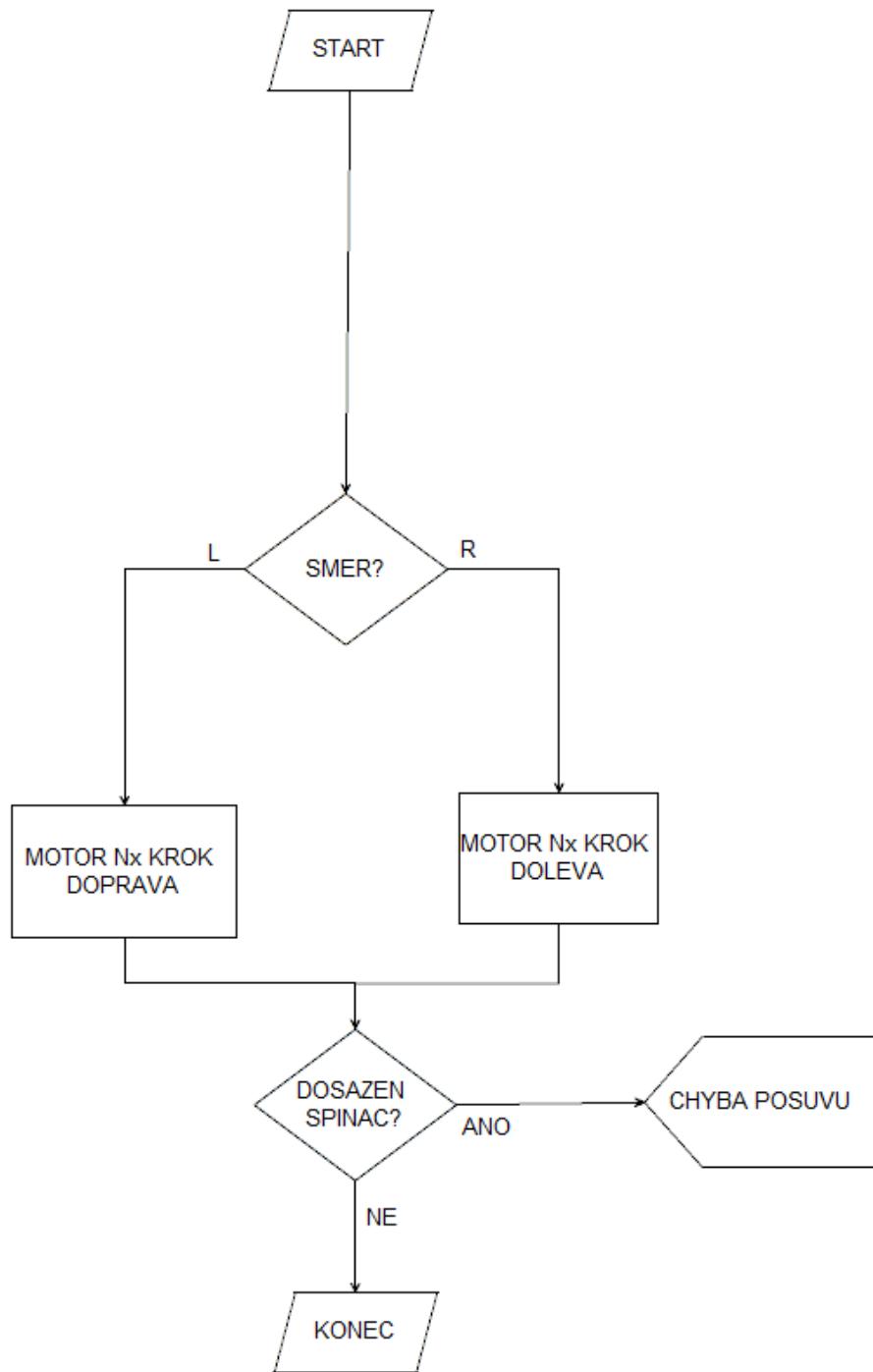
Jako první dochází k nastavení osy Z, následně Y a jako poslední X. Průběh podprogramu *krok.c* je vyobrazen na obrázku 29. V prvé řadě dochází k výběru osy. Parametr osy, která je obsluhována, je definován podle toho, v jakém kroku *kalibrace.c* se program aktuálně nachází. *Kalibrace.c* také nastaví parametru **DOMU=ANO**, čímž se zajistí přechod do kalibračního cyklu v podprogramu *krok.c*. Třetím krokem podprogramu *krok.c* je volání dalšího podprogramu, kterým je *posuv.c*. Ten zajistí ověření, že není sepnut koncový spínač. V případě jeho sepnutí je obsluha upozorněna chybovou hláškou. Není-li spínač sepnut, tak dochází k pokračování podprogramu *posuv.c*, ve kterém se vybere směr otáčení vlevo a tím se podprogram *posuv.c* ukončí. Tento podprogram je zobrazen na obrázku 30. Program pokračuje další částí podprogramu *krok.c*, kterým je vyhodnocení, zda osa dosáhla krajní meze, tj. zda došlo k sepnutí koncového spínače. Pakliže spínač nebyl dosud sepnut, tak se znova zavolá podprogram *posuv.c* a po jeho ukončení se podmínka vyhodnotí znovu. V případě splnění této podmínky zavolá *krok.c* podprogram *couvani.c* zobrazený na obrázku 31.



Obrázek 29 - Vývojový diagram podprogramu krok.c



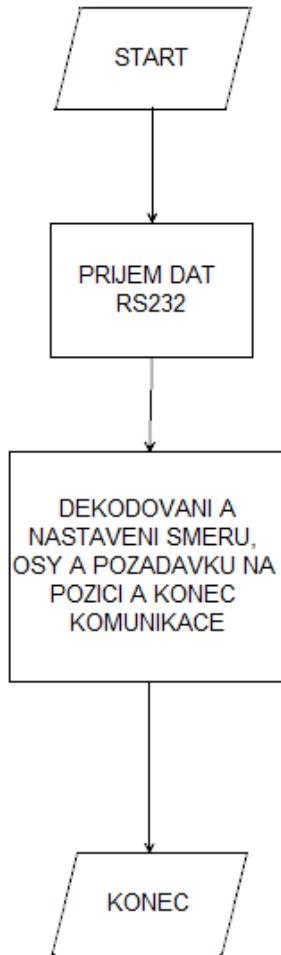
Obrázek 30 - Vývojový diagram podprogramu posuv.c



Obrázek 31 - Vývojový diagram podprogramu

*Couvani.c* ve svém prvním kroku vyhodnotí, na kterou stranu se motor otáčí a v následujícím kroku provede potřebný počet kroků opačným směrem, aby došlo k opětovnému uvolnění koncového spínače. Třetím krokem je vyhodnocení podmínky, zda po zacouvání potřebného počtu kroků došlo k uvolnění spínače. V případě, že spínač nebyl uvolněn, tak dochází k neočekávané události, která signalizuje chybovou hlášku obsluze. Je-li podmínka splněna a spínač není sepnut, tak dochází k ukončení podprogramu *couvani.c* a návratu do *krok.c*.

Jelikož krok couvání byl posledním krokem tohoto podprogramu, tak dochází k jeho uzavření a návratu do *kalibrace.c*.



Obrázek 32 - Vývojový diagram podprogramu *serial.c*

Po dokončení *kalibrace.c* kód pokračuje dalším příkazem v hlavním programu *main.c*, kterým je zavolání podprogramu *serial.c* (obrázek 32). Tento podprogram slouží pro příjem a dekódování dat z nadřazeného systému Labview, který je popsán v další kapitole. V prvním kroku tohoto podprogramu dochází k otevření sériové komunikace a příjmu dat po sériové komunikaci RS232. Ve druhém kroku se přijatá data dekódují a zároveň probíhá výběr osy, která se bude otáčet, nastavení směru otáčení a požadované délky následujícího pohybu. Jako poslední proběhne ve druhém kroku ukončení otevřené sekvence sériové komunikace a v následujícím kroku se podprogram *serial.c* uzavírá a dochází k návratu do hlavního programu *main.c*.

Následně je volán *krok.c* s příznaky DOMU=NE, požadovanou osou a směrem otáčení. Ten jako první provede výběr osy (definován z *main.c*) a následně pokračuje skrze podmítku DOMU?, která není v tomto případě splněna.

Po této podmínce dochází k volání podprogramu *posuv.c*, který otestuje, zda není dosažen koncový spínač a případně upozorní obsluhu. Pakliže je vše v pořádku, tak dochází k výběru směru otáčení, provedení kroku motoru požadovaným směrem a návratu do hlavního programu. V něm následuje dotaz na uzavření sériové komunikace. Je-li uživatel vybrána možnost NE, pak se program vrátí na začátek smyčky a otevře novou sekvenci sériové komunikace v *serial.c* a čeká na vstupní data od uživatele a celá smyčka se znova zopakuje. Vybere-li obsluha na dotaz konec komunikace volbu ANO, pak je zavolán podprogram *kalibrace.c*, jehož průběh byl již popsán výše. V tomto případě však tato procedura neslouží ani tak ke kalibraci, jako k „zaparkování“ soustrojí, tj. jeho uvedení do výchozí pozice. Hlavním důvodem tohoto posunu je skladnost zařízení v případě přepravy. Dosažení výchozí pozice je posledním krokem programu *main.c* a dochází k ukončení celého programu.

Hlavní program *main.c* společně s ostatními podprogramy zajišťuje základní ovládání hardwarových prvků, tj. motorů a koncových spínačů. Další použité přístroje (kontinuum laser, multimetry...) je již možné ovládat pomocí nadřazených programů, mezi které patří např. Labview, které je využito v této práci a je podrobněji popsáno v následující kapitole.

#### 4.2.2 Uživatelské rozhraní Labview

Pro komunikaci s obsluhou slouží program Labview, který je nadřazeným programem pro výše popisovaný program nahraný do vývojové desky Arduino UNO. Tento systém zajišťuje sběr dat od uživatele a jejich předání po sériové komunikační lince do řídicí jednotky Arduino UNO pomocí USB. Zároveň monitoruje parametry získané z této jednotky a vrací je uživateli do zobrazovacího prostředí SCADA. SCADA je grafické prostředí zprostředkující zobrazení aktuálního online stavu konkrétního hardwaru a jeho případné ovládání v grafické rovině (přepínače, zadání hodnoty, výběr parametru z nabídky atd.). Systém Labview je naistalován na počítači, pomocí kterého je ovládáno a monitorováno celé pohyblivé soustrojí.

Budoucí práce předpokládá s rozšířením ovládání v grafickém uživatelském rozhraní, zejména implementaci ovládání kontinuum laseru a připojených měřících přístrojů.

## 5 Závěr

V rámci práce byly zkoumány možnosti měření spektrální odezvy fotovoltaických článků, respektive modulů, která je důležitým parametrem při určování jejich základních parametrů a při nesprávné interpretaci může vést ke značným chybám měření. Dostupné metody využívají pro měření spektrální odezvy buď spektrální filtry, nebo v případě menších vzorků monochromátor, což značně omezuje možnosti využití na reálných modulech. Z tohoto důvodu byl navrhnut nový způsob měření využívající kontinuum laser.

V další části práce bylo navrhнуто konstrukční řešení zařízení, které v budoucnosti umožní automatizované měření spektrální odezvy v libovolných bodech fotovoltaického článku na modulu. Pro ovládání pohybového mechanizmu byla využita vývojová deska Arduino UNO spojená s Labview.

V budoucnosti bude zkonstruované zařízení rozšířeno o ovládání laseru a doplněno o samotné měření spektrální odezvy.

## 6 Reference

- [1] Augustin-Jean Fresnel and the Wave Theory of Light. *SciHi* [online]. 2018, 10 March 2018 [cit. 2019-03-07]. Dostupné z: <http://scihi.org/augustin-jean-fresnel-wave-theory-light/>
- [2] VILHELM, Svatopluk. *Spektrální citlivost fotovoltaických modulů*. Praha, 2015. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická.
- [3] Electromagnetic spectrum. In: *Electromagnetic Spectrum Science* [online]. [cit. 2019-03-24]. Dostupné z: <https://electromagneticspectrumscience.weebly.com/visible-light.html>
- [4] EMP, jeho složky a vlnová délka. In: *Tzbinfo* [online]. Praha: ČNTL - České nakladatelství technické literatury, 2015 [cit. 2019-03-24]. Dostupné z: <https://elektro.tzb-info.cz/13319-ucinky-elektromagnetického-pole-na-lidský-organismus>
- [5] Jaderná a radiační fyzika. *Jaderná a radiační fyzika* [online]. [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika.htm#Dualismus>
- [6] RNDr. Vojtěch Ullmann: Jaderná a radiační fyzika. In: *AstroNuklFyzika* [online]. Ostrava [cit. 2019-03-07]. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/Fotoefekt.gif>
- [7] Standart Solar Spectra. In: *PVEDUCATION.ORG* [online]. [cit. 2019-02-12]. Dostupné z: <https://www.pveducation.org/pvcdrrom/appendices/standard-solar-spectra>
- [8] FICEK, Tomáš. *Vliv proměnné intenzity na účinnost fotovoltaického panelu*. Brno, 2012. Bakalářská práce. Masarykova Univerzita, Pedagogická fakulta, Katedra fyziky.
- [9] Optické metody. In: *Informační systém Masarykovy univerzity* [online]. Brno, [2015] [cit. 2019-03-17]. Dostupné z: [https://is.muni.cz/el/1411/jaro2015/BLIT0222p/um/Denzi\\_elisa.pdf](https://is.muni.cz/el/1411/jaro2015/BLIT0222p/um/Denzi_elisa.pdf)
- [10] ČSN EN 60904-7. *Fotovoltaické součástky*. 2. vyd. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [11] Solar Cell I-V Characteristic Curve. In: *Alternative energy tutorials* [online]. Alternative energy tutorials, c2010-2019 [cit. 2019-03-18]. Dostupné z: <http://www.alternative-energy-tutorials.com/energy-articles/solar-cell-i-v-characteristic.html>
- [12] Spectral Response. In: *PVEDUCATION.ORG* [online]. PVeducation, 2019 [cit. 2019-03-18]. Dostupné z: <https://www.pveducation.org/sites/default/files/PVCDROM/Solar-Cell-Operation/Images/SRREAL.gif>
- [13] BURDOVÁ, Pavla. *FILTRY V OPTICE A OPTOMETRII*. Brno, 2012. Bakalářská práce. Masarykova Univerzita, Lékařská fakulta.
- [14] KADAR, Peter a Andrea VARGA. Measurement of spectral sensitivity of PV cells. *2012 IEEE 10th Jubilee International Symposium on Intelligent Systems and Informatics* [online]. IEEE, 2012, 2012, 549-552 [cit. 2019-03-24]. DOI: 10.1109/SISY.2012.6339582. ISBN 978-1-4673-4750-1. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6339582/>

- [15] KINSEY, Geoffrey S. a Kenneth M. EDMONDSON. Spectral response and energy output of concentrator multijunction solar cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* [online]. 2009, **17**(5), 279-288 [cit. 2019-05-13]. DOI: 10.1002/pip.875. ISSN 10627995. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/pip.875>
- [16] Analysis of spectral effects on the energy yield of different PV (photovoltaic) technologies: The case of four specific sites. 2014, **2014**(67), 435-443. DOI: 10.1016/j.energy.2014.01.024.
- [17] WHITE, Malcolm, Marek SMID a Geiland PORROVECCHIO. Realization of an accurate and repeatable wavelength scale for double subtractive monochromators. *Metrologia* [online]. 2012, **49**(6), 779-784 [cit. 2019-03-24]. DOI: 10.1088/0026-1394/49/6/779. ISSN 0026-1394. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/0026-1394/49/i=6/a=779?key=crossref.ee5653db545b914ac212844c767a81f2>
- [18] World's first white laser demonstrated. *New Atlas* [online]. 2015, **2015** [cit. 2019-03-18]. Dostupné z: <https://newatlas.com/worlds-first-white-laser-demonstrated/38691/>
- [19] ULN2803A. In: *Alldatasheet.com* [online]. Dallas: Texas Instruments, 1997 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: [https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=Uln2803a%20Datasheet&gclid=Cj0KCQjww47nBRDIARIsAEJ34bmq3m0-fVh0muarc1ji6I1TnTUGchHQHS\\_dkhzzlZKD-02gm6KArRMaAqB7EALw\\_wcB](https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=Uln2803a%20Datasheet&gclid=Cj0KCQjww47nBRDIARIsAEJ34bmq3m0-fVh0muarc1ji6I1TnTUGchHQHS_dkhzzlZKD-02gm6KArRMaAqB7EALw_wcB)