



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV PŘÍSTROJOVÉ A ŘÍDICÍ TECHNIKY

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Modernizace spektrometru Specord M42/400 – Hardware

Bc. Jan Benda

2022/2023

Vedoucí práce: Ing. Bc. ŠÁRKA NĚMCOVÁ, Ph.D.

**Zadání práce:****ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE****I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE**

Příjmení: **Benda** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **484733**  
 Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
 Zadávací katedra/ústav: **Ústav přístrojové a řídicí techniky**  
 Studijní program: **Automatizační a přístrojová technika**  
 Specializace: **Automatizace a průmyslová informatika**

**II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI**

Název diplomové práce:

**Modernizace spektrometru Specord M42/400 - hardware**

Název diplomové práce anglicky:

**Modernization of spectrometer Specord M42/400 - hardware**

Pokyny pro vypracování:

Spektrometr Specord M42/400 má kvalitní optickou a mechanickou část, ale nefunkční elektroniku. Cílem práce je přispět k znovu zprovoznění přístroje a vybavit ho moderním řízením.

Úkoly:

1. Rešerše typů spektrometrů, jejich součástí a principu fungování
2. Identifikace funkce jednotlivých komponent spektrometru, rozhodnutí o jejich zachování či výměně
3. Návrh a realizace nové řídicí elektroniky spektrometru
4. Experiment ověřující funkčnost nové sestavy

Seznam doporučené literatury:

1. Václavík P.: Technická optika II, skriptum ČVUT, 1983
2. Yoder P.R.: Opto-mechanical systems design, New York, 1993
3. Novák, J. Elektromechanické systémy v dopravě a ve strojírenství. Skriptum ČVUT, 2002

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Bc. Šárka Němcová, Ph.D. odbor přesné mechaniky a optiky FS**

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

Datum zadání diplomové práce: **28.04.2023**Termín odevzdání diplomové práce: **08.06.2023**

Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_

Ing. Bc. Šárka Němcová, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.  
podpis děkana(ky)

**III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ**

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně s tím, že její výsledky mohou být dále použity podle uvážení vedoucího práce jako jejího spoluautora. Souhlasím také s případnou publikací výsledků práce nebo její podstatné části, pokud budu uveden jako její spoluautor.

Dne:

Podpis:

## **Poděkování**

Za velmi užitečné a cenné rady týkající se zpracování této diplomové práce bych chtěl poděkovat vedoucí práce Ing. Bc. Šárce Němcové Ph.D. a ostatním vyučujícím z oboru přesné mechaniky a optiky. Zároveň bych chtěl poděkovat své rodině za trpělivost a klidné zázemí. Dále bych chtěl poděkovat Lence Záhejské za to, že při mně pevně stojí a ve všem mě plně podporuje. V předposlední řadě bych chtěl poděkovat skupině mých nejlepších “feláků“, kteří se mnou drží v dobrém i ve zlém. A jako poslednímu bych chtěl poděkovat Bc. Lukášovi Bláhovi za spolupráci při renovaci spektrometru.

**Seznam použitých zkratek:**

- Optický senzor původní – OSP
- Optický senzor nový – OSN
- Koncový senzor – KS
- GND – uzemnění
- VCC – napájení

**Obsah:**

Zadání práce: .....	2
Prohlášení: .....	3
Poděkování .....	4
Seznam použitých zkratk: .....	5
Anotace: .....	9
Klíčová slova: .....	9
Abstract: .....	10
Key words: .....	10
1. Úvod .....	11
1.1. Cíl práce .....	11
1.2. Volba tématu .....	11
2. Teoretická část .....	12
2.1. Spektrometrie .....	12
2.1.1. Spektroskopie .....	12
2.1.2. Spektrofotometrie .....	13
2.2. Spektrometr .....	15
2.2.1. Historie spektrometrů .....	17
2.2.1.1. Specord .....	19
2.2.2. Současné spektrometry .....	21
2.2.2.1. Vláknové spektrometry .....	22
2.2.2.2. UV-VIS spektrometry .....	22
2.2.3. Hlavní komponenty spektrometrů .....	23
2.2.3.1. Fotonka .....	23
2.2.3.2. Fotonásobič .....	24
2.2.3.3. CCD (Charge-coupled device) .....	25
2.2.3.4. Optický hranol .....	26

2.2.3.5.	Optická mřížka.....	27
2.3.	Souhrn teoretické části.....	29
3.	Praktická část.....	30
3.1.	Modernizovaný spektrometr Specord M42/400 .....	30
3.2.	Počátek modernizace .....	31
3.2.1.	Princip fungování Specordu M42/400.....	31
3.2.2.	Fotografie rozebíraného Specordu M42/400 .....	32
3.3.	Součásti Specordu M42/400.....	33
3.3.1.	Prostor optické cesty .....	35
3.3.1.1.	Senzory .....	35
3.3.1.2.	Krokový motor mřížka (pracovní označení: <b>stepperMriz</b> ) .....	36
3.3.1.3.	Krokový motor cesta (pracovní označení: <b>stepperCesta</b> ) .....	39
3.3.1.4.	Krokový motor šterbina (pracovní označení: <b>stepperSterbina</b> ).....	40
3.3.1.5.	Krokový motor filtr (pracovní označení: <b>stepperFiltr</b> ) .....	41
3.3.1.6.	Krokový motor světlo (pracovní označení: <b>stepperSvetlo</b> ).....	42
3.3.1.7.	Optická mřížka.....	43
3.3.1.8.	Halogenový světelný zdroj .....	44
3.3.1.9.	Deuteriový světelný zdroj.....	44
3.3.2.	Detektor .....	45
3.3.2.1.	Nový fotonásobič.....	46
3.3.2.2.	Wattmetr .....	47
3.4.	Současná řídicí elektronika.....	49
3.4.1.	Raspberry Pi.....	50
3.4.2.	Arduino .....	50
3.4.3.	Drivery motorů .....	52
3.4.4.	Prototypové desky.....	55
3.4.5.	Relé .....	55

3.4.6. Elektronické schéma .....	55
3.5. Princip fungování modernizovaného Specordu M42/400 .....	57
3.5.1. Kompletní modernizované pracoviště .....	62
3.6. Provedený experiment (test funkčnosti) .....	63
3.7. Doporučení pro další postup renovace .....	66
3.7.1. Výměna detektoru .....	66
3.7.2. Výroba krytu řídicí elektroniky .....	67
3.7.3. Zprovoznění deuteriové výbojky .....	67
4. Závěr .....	68
Bibliografie .....	69



## **Anotace:**

Tato diplomová práce se zabývá modernizací spektrometru Specord M42/400. Tyto spektrometry byly vyráběny v osmdesátých letech dvacátého století firmou Carl Zeiss Jena. Spektrometr byl již nefunkční, a proto bylo nutné začít s jeho opravou. Modernizace byla prováděna s kolegou Bc. Lukášem Bláhou, který se zaměřoval na softwarovou část problematiky a já se věnoval té hardwarové.

Průběh modernizace byl započat rešerší zaměřenou na samotnou spektrometrii. Bylo nutné se seznámit se základními principy spektrometrie, optiky a zároveň s fungováním přístrojů, které se ke spektrometrii využívají. Všechny tyto informace byly použity k pochopení konstrukce a fungování modernizovaného spektrometru Specord M42/400.

Praktická část modernizace byla rozdělena na dvě části. V první části se zaměřuji primárně na montážní a elektrikářské práce, které jsem využil k úplnému pochopení fungování spektrometru a také k jeho opravě. Spektrometr byl rozmontován na jednotlivé součásti a byla identifikována jeho elektronika (motory, senzory, světelné zdroje), která se nacházela uvnitř konstrukce. Všechny vodiče byly přiřazeny k elektronickým komponentům, které byly otestovány a uvedeny do provozu. K uvedení do provozu a následnému řízení byly použity zdroje elektrického napájení, drivery k motorům, mikroprocesor Arduino MEGA a mikropočítač Raspberry Pi.

Poté, co byla vyřešena problematika týkající se řízení, zapojení a uložení nové elektroniky v konstrukci spektrometru, tak jsem se zaměřil na detektor. Jednalo se o fotonásobič, který vyhodnocuje intenzitu záření o různých vlnových délkách. Nebylo možné tento původní fotonásobič použít z důvodu absence starého elektrického schématu. Bylo proto potřeba nově zakoupený detektor optimálně umístit do konstrukce spektrometru, připojit ho k řídicí elektronice a kompatibilitu s řídicí elektronikou otestovat.

Výsledkem mé diplomové práce je provedený experiment záznamu spektra na modernizovaném spektrometru.

## **Klíčová slova:**

Spektrometr, Zeiss, řízení, arduino, raspberry Pi, fotonásobič, spektrum, modernizace

## **Abstract:**

This thesis deals with the modernization of the Specord M42/400 spectrometer. These spectrometers were manufactured in the 1980s by Carl Zeiss Jena. The spectrometer was no longer functional and therefore it was necessary to start repairing it. The modernization was carried out with my colleague Bc. Lukáš Bláha, who focused on the software part of the problem and I worked on the hardware part.

The modernization process started with a research focused on the spectrometry itself. It was necessary to get acquainted with the basic principles of spectrometry, optics and also with the functioning of the instruments used for spectrometry. All of this information was used to understand the design and operation of the upgraded Specord M42/400 spectrometer.

The practical part of the upgrade was divided into two parts. In the first part, I focused primarily on the assembly and electrician work, which I used to fully understand the workings of the spectrometer and also to repair it. The spectrometer was disassembled into its individual components and its electronics (motors, sensors, light sources) that were located inside the structure were identified. All wires were matched to the electronic components, which were tested and put into operation. Power supplies, motor drivers, an Arduino MEGA microcontroller and a Raspberry Pi microcomputer were used for commissioning and subsequent control.

Once the issues relating to the control, wiring and placement of the new electronics in the spectrometer design had been resolved, I turned my attention to the detector. This was a photomultiplier that evaluates the intensity of radiation at different wavelengths. It was not possible to use this original photomultiplier due to the absence of the old electrical schematic. It was therefore necessary to optimally place the newly purchased detector in the design of the spectrometer, connect it to the control electronics and test its compatibility with the control electronics.

The result of my thesis is a spectrum recording experiment performed on the upgraded spectrometer.

## **Key words:**

Spectrometer, Zeiss, arduino, raspberry Pi, photomultiplier tube, spectrum, modernization

# 1. Úvod

## 1.1. Cíl práce

Cílem mé diplomové práce je seznámení se se základními principy spektrometrie a zároveň s konstrukcí a fungováním samotného spektrometru. Na základní principy spektrometrie se má práce zaměřuje spíše v teoretické části a na přístroj zas v části praktické. Konstrukční a funkční poznatky reprezentují skrze modernizace starého spektrometru Specord M42/400. Práce by tedy měla posloužit jako detailní popis modernizačních prací a zároveň jako technická zpráva modernizovaného spektrometru.

Výsledkem mé práce je funkční spektrometr, na kterém je možné provádět spektrální měření a zaznamenávat jejich výsledky.

## 1.2. Volba tématu

Téma diplomové práce jsem si vybral z důvodu mých nedostatečných znalostí v oboru optiky. Chtěl jsem se v optice více vzdělat a zároveň mě lákala praktická část práce. Věděl jsem, že se při bližším seznamování s konstrukcí a fungováním spektrometru dostanu k elektronické, mechanické a řídicí stránce problematiky.

Toto komplexní zaměření tématu mě velmi zaujalo, protože je pro mě do budoucna opravdu užitečné. Díky veškerým poznatkům získaným v průběhu řešení diplomové práce nebudu nikdy ztracen při zpětném inženýrství, a to nejen v oboru optických přístrojů.

Osvojil jsem si manuální, mechanickou a elektrotechnickou zručnost při řešení podobných modernizačních nebo návrhových pracích. Proto pro mě byl výběr tohoto tématu jasnou volbou.

V poslední řadě bych chtěl zmínit, že rád na projektech spolupracuji s kolegy. Zde byla tato možnost, což se stalo dalším důležitým aspektem při rozhodování o výběru tématu diplomové práce.

## 2. Teoretická část

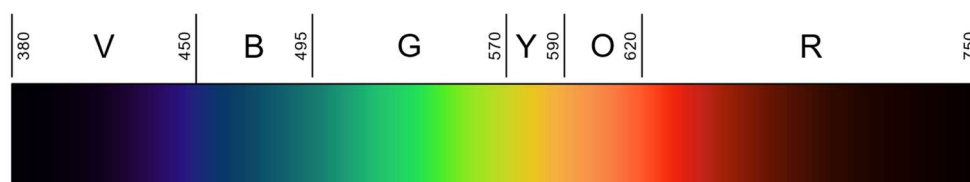
### 2.1. Spektrometrie

Spektrometrie jako taková je fyzikální obor, který se zabývá vznikem, vlastnostmi a měřením spekter látek [1]. Nejde tedy čistě jen o optickou spektrometrii, kterou se zabývá tato diplomová práce, ale existuje jich více druhů. Například se může jednat o atomovou nebo o hmotnostní spektrometrii.

V celé teoretické části se zaměřím konkrétně jen na spektrometrii optickou, která se nazývá spektrofotometrie. Zároveň zde porovnáím rozdíly mezi zmíněnou spektrofotometrií a spektroskopií. Jde totiž o často zaměňované pojmy, které se podobají, ale ve své podstatě se liší.

#### 2.1.1. Spektroskopie

Spektroskopie je věda, která se zabývá absorpcí a vyzařováním světla nebo jiného záření určitým měřeným materiálem. [2] Součástí takové vědy je rozložení světelného svazku, který je formou elektromagnetického vlnění na jednotlivé vlnové délky → světelné spektrum.

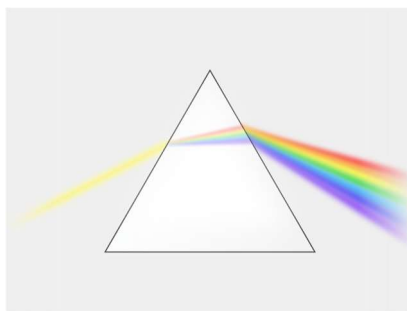


Obrázek 1 Lineární viditelné spektrum [3]

Číselná označení nad viditelným spektrem reprezentují hodnoty vlnové délky  $\lambda$  [nm] světelného záření a písmena jednotlivé barvy: V – fialová, B – modrá, G – zelená, Y – žlutá, O – oranžová, R – červená.

K rozkladu světla na spektrum se používají disperzní prvky, nejčastěji hranol nebo mřížka. Světlo při průchodu hranolem mění směr šíření díky disperzi, při které se jednotlivé vlnové délky lámou pod různými úhly. [4].

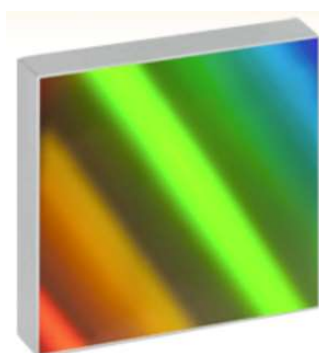
Výzkumu rozkladu světla se začal věnovat jako první Isaac Newton, který za sebe umístil dva trojúhelníkové skleněné hranoly, jež se spojovaly základnami. Po přivedení světelného paprsku na první hranol se paprsek rozdělil na viditelné spektrum barev a druhý hranol toto spektrum zas sloučil do jediného paprsku.



Obrázek 2 Zjednodušená reprezentace optického hranolu [5]

Dalším hojně využívaným zařízením v optických aplikacích je optická mřížka. V průběhu let v přístrojích nahradila optický hranol. Optická mřížka má na svém povrchu velké množství ekvidistantních rovnoběžných štěrbin. Díky těmto štěrbinám, které mají určitou šířku a jsou od sebe vzdáleny o určitou délku, je světlo rozloženo na spektrum, tak jako v předešlém případě u optického hranolu.

V principu tedy pokud na mřížku dopadá světelná vlna, stává se každý bod v každé štěrbině zdrojem šířícího se všesměrového elementárního vlnění. Dochází k difrakci (ohybu) světla. Elementární vlny spolu při svém dalším postupu interferují, což se projeví vznikem periodicky rozmístěných interferenčních maxim [6] → světelné spektrum.



Obrázek 3 Příklad optické mřížky [7]

Výše zmíněné disperzní prvky jsou v průmyslu nejvíce používané k rozložení světelného svazku na jeho spektrum. Po rozložení světla se zkoumá měřený vzorek, který je vystaven záření o různých vlnových délkách.

Předchozí popis disperzních zařízení byl pouze obecný, detailnější popis obsahuje podkapitola **2.2.3. Součásti spektrometru.**

### 2.1.2. Spektrofotometrie

V případě spektrofotometrie je výsledkem tohoto procesu graf závislosti intenzity záření na vlnové délce. Je to tedy kvantitativní měření emisních, odrazových nebo propustných vlastností materiálu jako funkce vlnové délky.

Pro názorný příklad spektrometrie si můžeme představit, že bychom chtěli odhalit, zda měřený vzorek, kterým je průhledné sklo, obsahuje ultrafialový filtr, či nikoli. Tento vzorek se vloží do spektrometru a nechá se prosvítit celým spektrem rozloženého světelného paprsku. Pokud sklo blokovalo vlnové délky ultrafialového záření, tak na detektoru uvidíme, že intenzita záření těchto vlnových délek bude velmi malá, až nulová. Tím jsme tedy provedli měření a zjistili filtrační vlastnost průhledného skla vzhledem k ultrafialovému záření. Z naměřených dat intenzity záření a velikostí vlnových délek se vykreslí graf jako záznam z příslušného měření.

Výše uvedené měření je příkladem absorpční spektrofotometrie. V praxi se dále provádí i spektrofotometrie emisní.

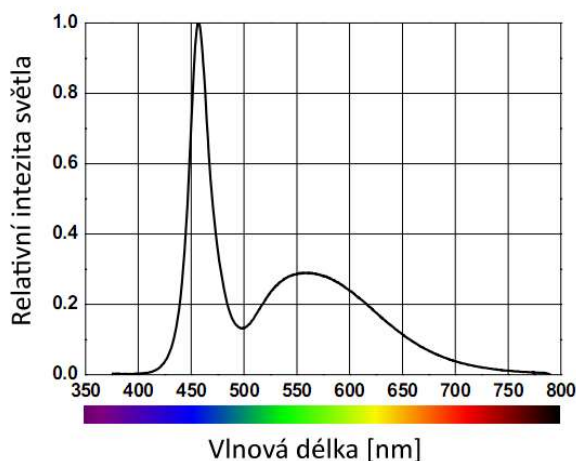
- Absorpční spektrofotometrie

Při absorpční spektrofotometrii zkoumáme, jak atomy nebo molekuly v průběhu procházení paprsků vzorkem (kapalina, plyn) absorbují určité fotony ze svazků světelného záření. Je to způsobeno kvantově mechanickým účinkem, kdy se absorbují pouze fotony s určitými energiemi. Toto lze pochopit pomocí diagramů energetické úrovně atomů a molekul [8].

- Emisní spektrofotometrie

Emisní spektrofotometrie se týká pouze měření spektrálních charakteristik látek, které se chovají jako světelný zdroj. Takové měření je prováděno při přímé detekci intenzity záření z měřeného světelného zdroje.

Jako příklad výsledku emisní spektrofotometrie uvedu níže spektrální charakteristiku LED diody.



Obrázek 4 Příklad spektrální charakteristiky LED diody [8]

Díky tomuto měření můžeme názorně vidět, na jakých vlnových délkách svítí zkoumané světelné zdroje, v tomto případě LED dioda. Vzhledem k těmto vlastnostem se dá například rozhodovat o vhodném použití světelných zdrojů pro různé aplikace. V běžném životě se používají například světelné zdroje s největší intenzitou vyzařování při větších vlnových délkách pro přípravu člověka ke spánku, kdy se zlepšuje tvorba hormonu melatoninu. [9]

- Základní rozdíly (shrnutí)

1. Spektroskopie je věda o studiu interakce mezi hmotou a vyzařovanou energií, zatímco spektrometrie je metoda používaná k získávání kvantitativního měření spektra.
2. Spektroskopie negeneruje žádné výsledky. Je to teoretický přístup vědy. Spektrometrie je praktická aplikace, kde se generují výsledky. [10]

## 2.2. Spektrometr

Spektrometrů existuje velké množství a liší se podle typu prováděné spektrometrie. Jak bylo uvedeno v kapitole **2.1 spektrometrie**, tak se má diplomová práce zaměřuje pouze na optické odvětví tohoto fyzikálního oboru. Spektrofotometr (dále jen spektrometr) je přístroj, jehož konstrukce se skládá z optických, mechanických a elektronických součástí.

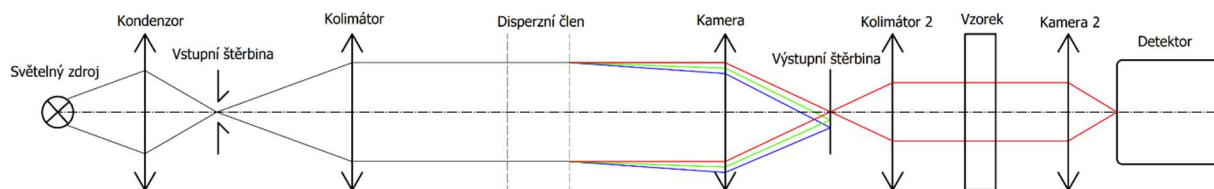
Tyto součásti mají ve většině případů konstrukce přístrojů určitou strukturu, jakým způsobem fungují a navzájem spolu interagují. Konkrétním součástí spektrometru se budu věnovat více v podkapitole **2.2.3. Součásti spektrometru**.

V případě spektrálních přístrojů je důležité rozlišovat mezi monochromátorem a spektrometrem.

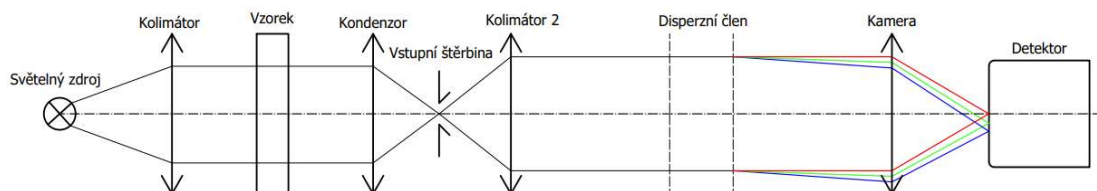
- Spektrometr z pravidla rozkládá světelný paprsek na spektrum až za vzorkem a skenuje detektorem všechny vlnové délky záření.
- Monochromátor rozkládá světelný paprsek na spektrum před vzorkem a svou výstupní štěrbinou propouští pouze záření o určité vlnové délce, které je zachyceno detektorem

V praktické části této diplomové práce je popisována modernizace monochromátoru s detektorem, který skenuje celé spektrum při pohybu optické mřížky. Tudíž může být nazýván spektrometrem (spektrofotometrem).

Tyto spektrální přístroje jsou například využívány v potravinářském, lékařském, chemickém a vesmírném průmyslu. Pro názornost principu fungování spektrometru a monochromátoru zde uvedu jejich základní optická schémata.



Obrázek 5 Základní struktura monochromátoru



Obrázek 6 Základní struktura spektrometru

- Popis schématu monochromátoru **Obrázek 5**:

Světelný zdroj slouží k emitaci paprsků světelného záření do optické cesty monochromátoru. Paprsky jsou vyzařovány rozbíhavě všemi směry. Tato rozbíhavost je v monochromátoru nežádoucí, a proto je nutné tyto paprsky směřovat k vstupní štěrbině.

K tomuto nasměrování bývá používán kondenzor, který reprezentuje čočka nebo specifické zrcadlo. Součást zařizuje sbíhavost paprsků k nastavitelné vstupní štěrbině. Na vstupní štěrbině lze například pomocí filtrů odfiltrovat určité vlnové délky, změnou její šířky redukovat množství procházejícího záření a zároveň ovlivňovat spektrální rozlišení.

Po průchodu vstupní štěrbinou paprsky rozbíhavě putují ke kolimátoru. Kolimátor reprezentuje také čočka nebo specifické zrcadlo, které zařizuje rovnoběžnost světelného svazku. Tato rovnoběžnost je žádoucí pro dopad světla na disperzní prvek.

Disperzním prvkem může být optický hranol, či optická mřížka. Tento prvek slouží k rozkladu světelného paprsku na jeho spektrum. Aby bylo možné na přístroji provádět měření celkových spektrálních charakteristik vzorku, tak je nutné disperzním prvkem pohybovat kvůli změření intenzity záření pro různé vlnové délky.

Poté, co je světelný paprsek již rozdělený, tak prochází kamerou, kterou opět reprezentuje čočka nebo specifické zrcadlo. Kamera směřuje dopadající záření přímo k nastavitelné výstupní štěrbině, kterou při otáčení disperzního prvku prochází pouze záření o specifické vlnové délce.

Za štěrbinou se nachází druhý kolimátor, který zařizuje rovnoběžnost paprsků záření o určité vlnové délce pro jejich průchod měřeným vzorkem. Pro nasměrování záření k detektoru se využívá druhá kamera.



Detektor zaznamenává intenzitu přicházejícího záření o různých vlnových délkách při otáčení disperzního prvku.

- Popis schématu spektrometru **Obrázek 6:**

Při popisu schématu spektrometru vynechám detailní popis součástí z důvodu jejich vysvětlení v popisu monochromátoru. Všechny použité součásti již byly popsány.

Světlo vyzářené světelným zdrojem dopadá na kolimátor, který zařídí rovnoběžnost světelného svazku. Poté svazek prochází vzorkem a dopadá na kondenzor. Kondenzor zajistí sbíhavost paprsků do vstupní štěrbině.

Za vstupní štěrbinou paprsky pokračují rozbíhavě k druhému kolimátoru, pro zajištění opět jejich rovnoběžnosti. Zde dopadají paprsky na disperzní prvek, kde jsou rozděleny na spektrum. Za disperzním prvkem se nachází kamera sloužící ke směřování paprsků na detektor. Vyhodnocení intenzity záření probíhá stejným způsobem jako u monochromátoru.

- Společné vlastnosti spektrometrů a monochromátorů

V monochromátorech a spektrometrech s většími rozměry se nachází prostor pro měření referenčního záření kvůli přesnému výsledku prováděného experimentu. Pomocí těchto přístrojů se mohou stanovovat například i chemická složení pevných materiálů, kapalin a plynů. Jednotlivé prvky v periodické soustavě prvků mají charakteristické vlnové délky, na kterých dochází k výrazné absorpci intenzity záření. Veškeré tyto vlastnosti se odvíjí od atomových a molekulových interakcí, o kterých jsem se již zmiňoval v předešlých kapitolách.

Výsledkem měření na obou přístrojích bývá spektrální charakteristika s předpisem:

$$\text{Intenzita záření} = f(\text{vlnová délka})$$

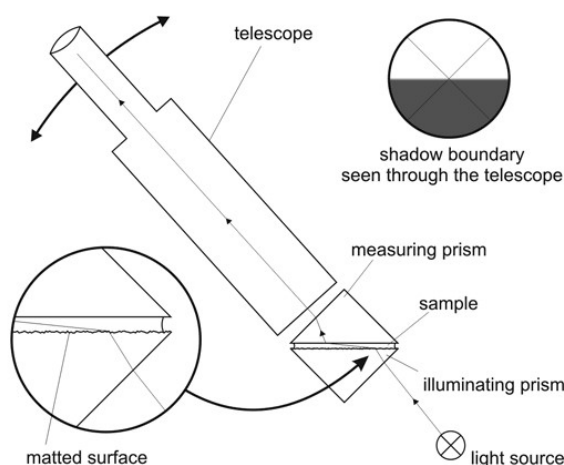
Měření na spektrometrech a monochromátorech je tedy nedestruktivní zkouškou a identifikací vzorku.

### 2.2.1. Historie spektrometrů

S historií spektrometrů je úzce spojena samotná historie spektroskopie, kde jsem se zmiňoval o Newtonových objevech. Poté co se spektroskopie začala rozvíjet a přišlo se na to, jakým způsobem bude pro člověka užitečná, tak se začala vynalézat zařízení, která ji využívají.

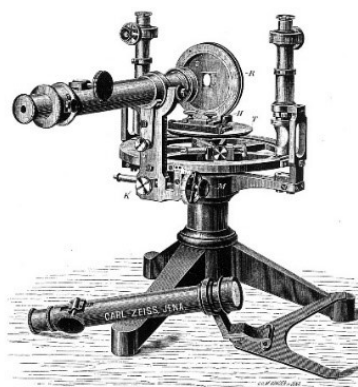
V historickém segmentu této diplomové práce bych chtěl zmínit jako první přístroj pro měření indexu lomu kapalin. Jedná se o Abbeho refraktometr. Součástí tohoto přístroje

byly dva hranoly, jeden osvětlovací a druhý měřící (refrakční). Měřená kapalina se umístila mezi přiklopené stěny těchto hranolů. Při osvětlení prochází světlo skrze osvětlovací hranol. Díky jeho zdrsňlému povrchu se světlo rozptýlí v kapalině všemi směry, takže dochází k jeho lomu. Pomocí vhodného pootočení dalekohledu můžeme vidět rozhraní, které je dáno mezními paprsky při úplném vnitřním odrazu. Tyto paprsky vycházejí z měřícího hranolu. Na stupnici dalekohledu můžeme přímo vyčíst hodnotu indexu lomu pro danou vlnovou délku. Příkladem může být typická hodnota 589,3 nm, což je střední vlnová délka dvojice spektrálních čar světla sodíkové výbojky, která se používá jako nejčastější zdroj světla. [11]



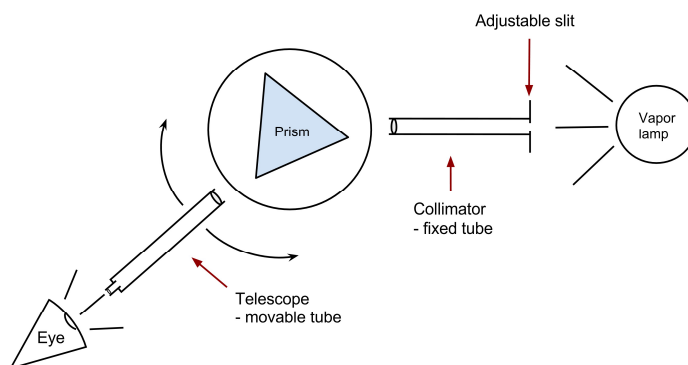
Obrázek 7 Schéma Abbeho refraktometru – doba vzniku 1874 [12]

Na základě tohoto vynálezu byl ve stejný rok vyroben firmou Carl Zeiss Jena první spektrometr. Jednalo se o hranolový spektrometr.



Obrázek 8 Hranolový spektrometr – doba vzniku 1874 [13]

Při používání tohoto spektrometru byla disperze světla pozorována díky optickému hranolu, na kterém probíhala. Hranol je osvětlován ze zdroje přes kolimátor a rozložené spektrum se pozoruje dalekohledem. Popis fungování hranolového spektrometru je znázorněn na schématu viz níže.



Obrázek 9 Schéma hranolového spektrometru [14]

Eye	Telescope - movable tube	Prism	Collimator - fixed tube	Adjustable slit
Oko - pozorovatel	Pohyblivý teleskop	Optický hranol	Statický kolimátor	Nastavitelná štěrba

Tabulka 1 Legenda k schématu hranolového spektrometru

Princip těchto hranolových spektrometrů je využíván i v současnosti, kde je možné hranol zaměnit za optickou mřížku.



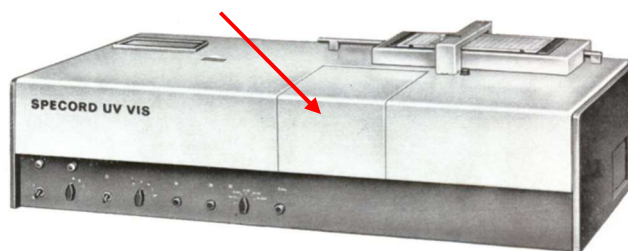
Obrázek 10 Současný goniometrický spektrometr založený na historickém principu [29]

V průběhu let výzkumu byla odhalena skutečnost, že díky světelnému spektru lze měřit například složení různých látek, a proto se k tomuto účelu musela přizpůsobit konstrukce přístrojů. Nutná byla i úprava optické aparatury, včetně disperzního zařízení. Některé přístroje začaly používat místo optického hranolu optickou mřížku. Rozšířila se i optická cesta, kterou paprsek putuje od světelného zdroje k detektoru.

Hlavním vylepšeným komponentem byl již zmíněný detektor. Šlo o nahrazení lidského oka elektronicko-optickou součástí, která dokáže identifikovat intenzitu záření. Díky tomuto zařízení bylo možné velmi přesně zaznamenávat výsledky provedených měření. Nejdříve přes analogová zařízení a poté přes digitální řídicí jednotku.

#### 2.2.1.1. Specord

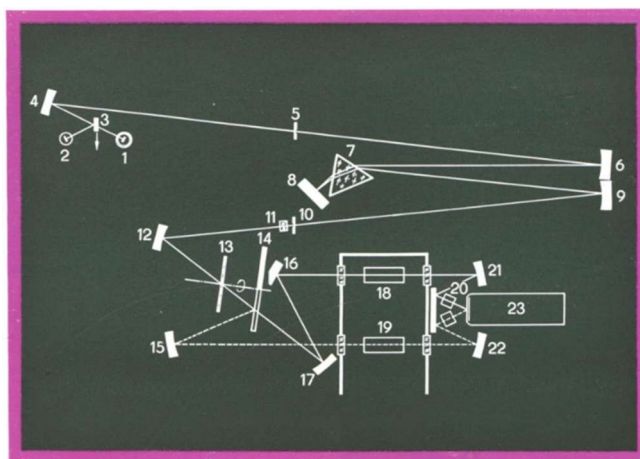
Jedním z prvních takto vylepšených přístrojů byl spektrometr Specord UV-VIS opět vyrobený firmou Carl Zeiss Jena. Tento spektrometr měl poněkud velké rozměry, ale dokázal zaznamenávat záření o vlnových délkách ve viditelném i ultra fialovém spektru.



Obrázek 11 Specord UV-VIS – doba vzniku 1968 [15]

V místě označeném červenou šipkou se ukládá měřený vzorek. Bylo zde umožněno i měření referenčního záření pro dosažení správných výsledků. V místě optické cesty se nacházela řídicí elektronika, která sloužila například k volbě průchodu záření měřenou nebo referenční větví, k regulaci změny otevření vstupní štěrbině nebo k přepínání světelných zdrojů (halogenová žárovka, deuteriová žárovka).

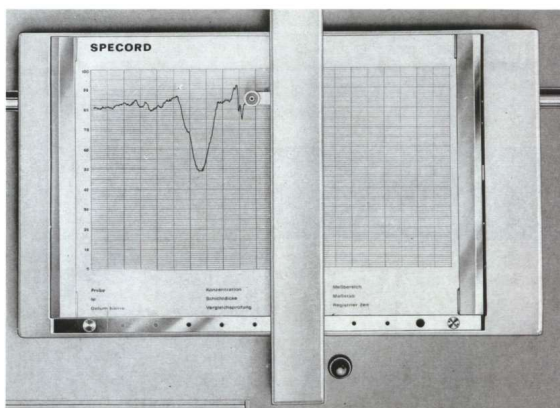
Tento spektrometr má velice podobné až totožné schéma uspořádání optické aparatury jako spektrometr modernizovaný, o kterém pojednává praktická část této diplomové práce.



Obrázek 12 Schéma Specord UV-VIS [15]

Celá sestava je založena na zrcadlových optických prvcích, označených čísly: 3, 4, 6, 9, 12, 13, 15, 16, 17, 20, 21 a 22. Čísly 2 a 1 jsou označeny světelné zdroje a číslo 7 reprezentuje disperzní zařízení. U Specordu UV-VIS disperzní zařízení představuje optický hranol. V poslední řadě číslem 23 je označený detektor záření.

Pomocí těchto spektrometrů bylo možné měřit pevné, kapalné a plynné vzorky. Dále také nabízely minimální manipulaci s celým přístrojem, protože nebylo potřeba zasahovat do rozmístění optické a elektronické aparatury. Všechna měření byla prováděna za krátký čas a byla zaznamenávána na papír pomocí analogově řízeného zapisovacího zařízení.



Obrázek 13 Příklad záznamu výsledku měření [15]

Jako poslední typ spektrometru z historické podkapitoly bych chtěl zmínit modernizovaný typ spektrometru Specord M42/400.



Obrázek 14 Fotografie Specordu M42/400 [16]

Základ tohoto spektrometru je úplně stejný jako u jeho předchůdce. Rozvržení umístění optiky, vzorků a detektoru zůstalo téměř beze změny. Jednou ze dvou změn je záměna optického hranolu za optickou mřížku a připojení modernější řídicí jednotky, kterou byl digitální počítač.

Přes tento počítač bylo možné řídit veškerou elektroniku uvnitř spektrometru, zároveň provádět a ukládat měření.

### 2.2.2. Současné spektrometry

V současné době není pravidlem, aby spektrometry měly velké rozměry, tak jak to bylo konstrukčně realizováno v minulosti. Z důvodu vývoje optických a elektronických součástí bylo možné konstrukci řešit v menších rozměrech a tím například zlepšit mobilitu měření.

### 2.2.2.1. Vlákňové spektrometry

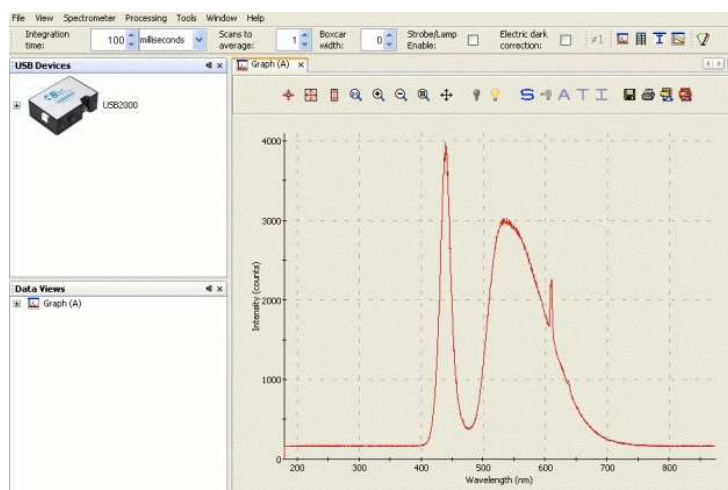
Velmi využívaným typem těchto přístrojů jsou vlákňové spektrometry. Konkrétně tyto spektrometry vynikají ve své mobilitě. Mají totiž malé rozměry a vcelku jednoduché provedení, a proto lze spektrometr nastavit tak, aby co nejlépe vyhovoval konkrétní aplikaci.



Obrázek 15 Vlákňový spektrometr od firmy Ocean Insight [37] Obrázek 16 Vnitřní struktura vlákňového spektrometru [36]

Vlákňové spektrometry využívají pro detekci intenzity záření malý CCD (Charge-coupled device) chip. Tento chip identifikuje intenzitu záření a převede ji přímo na digitální signál k následnému zpracování. Ve spojitosti s touto skutečností je nutné zmínit nejzásadnější výhodu měření s těmito spektrometry, a tou je přímé připojení k počítači přes USB. V počítači je nainstalovaný vyhodnocovací software, který v reálném čase měří intenzitu záření světelného paprsku přicházejícího do optického vlákna spektrometru.

Příkladem takového softwaru může být například SpectraSuite.



Obrázek 17 Prostředí softwaru SpectraSuite [17]

### 2.2.2.2. UV-VIS spektrometry

UV-VIS spektrometry jsou přístroje o větších rozměrech a fungující na velmi podobných až identických principech jako spektrometry staré (např. Specord). I přes to, že jsou tyto přístroje poněkud větších rozměrů než předešlé vlákňové, tak se jejich velikost

oproti těm historickým zredukovala. Využívají se primárně v laboratořích chemického a potravinářského průmyslu, kdežto vláknové spektrometry jsou ideální pro jakékoli použití mimo laboratorní prostředí.

Pro detekci záření většinou nemůže být použit CCD chip, protože je zde vyžadována větší přesnost na prováděná měření. Navíc u CCD chipu je nutné přivádět rozložené světlo velmi přesným směrem, aby dopadalo na fotocitlivou plochu o malých rozměrech. Principu fungování CCD chipů a ostatních detektorů se budu více věnovat v další podkapitole.

Technická specifikace a výbava těchto spektrometrů odpovídá současnému technologickému pokroku, takže například vzhledem k řídicímu počítači se zde můžeme setkat s dotykovými plochami a velmi intuitivním ovládáním. Optický systém uvnitř spektrometru bývá většinou velmi výkonný, kdy spektrální rozsah dosahuje například hodnot od 190 nm do 1100 nm vlnových délek a je zajištěna velmi nízká hodnota nežádoucího rozptýleného světla. [18] Na spektrometrech mohou být prováděna měření ultrafialové části spektra měřeného záření anebo ve viditelné části. Toto zajišťují dva světelné zdroje, kterými jsou halogenová žárovka a deuteriová výbojka.



Obrázek 18 Příklad moderního spektrometru DS5 od firmy Edinburgh Instruments [18]

### 2.2.3. Hlavní komponenty spektrometrů

Elektronické, optické a mechanické součásti spektrometrů se liší vzhledem k celkovému provedení přístrojů, o kterých byla zmínka v předešlých podkapitolách. Jde o to, že v případě použití menších spektrometrů je nemožné využívat pro detekci intenzity záření velké zařízení jako fotonásobič a u velkých přístrojů zas CCD chip. Proto je nutné tyto součásti odlišovat a správně používat.

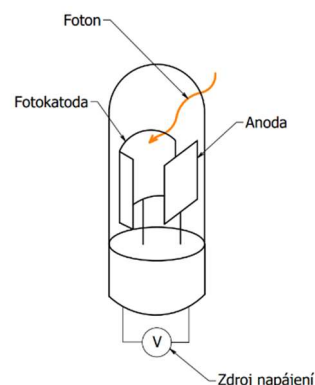
#### 2.2.3.1. Fotonka

Fotonka je typ záření, které se řadí mezi detektory s vnějším foto efektem. Jedná se o detektory, které jsou teplotně stabilní, mají vysokou citlivost a fotocitlivou plochu. Zároveň je lze provozovat při nízkém napětí.

Detektor se skládá z fotokatody a anody. Princip fungování je založen na dopadání fotonů na fotokatodu, kdy se po dopadu vyzáří fotoelektron, který doputuje na povrch anody a anoda vyšle analogový signál indikující intenzitu dopadajícího záření.



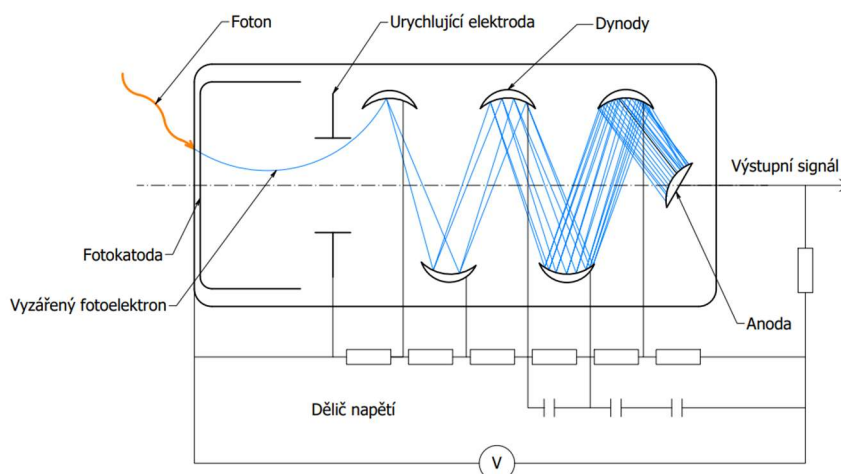
Obrázek 20 Fotonka [28]



Obrázek 19 Zjednodušený náčrt fotonky

### 2.2.3.2. Fotonásobič

Tento detektor je také součástí skupiny detektorů s vnějším foto efektem. Jedná se o citlivější detektor, než kterým je fotonka. Vysoká citlivost fotonásobiče spočívá právě v samotném násobení. V principu, když dopadá foton světelného záření na fotokatodu, tak se vyzáří fotoelektron stejným způsobem, jako u fotonky. Vyzářený fotoelektron ale nedopadá přímo na anodu, ale prochází skrz urychlující elektrodu a dopadá na jednotlivé dynody. Tím, jak se od dynod odráží, tak se násobí a zesiluje. Tato vlastnost dynod je zajištěna správným připojením na dělič napětí, který je oproti fotonce napájen velmi vysokým napětím například až 1000 V. Znásobený fotoelektron nakonec dopadá na anodu, kde je odeslán analogový výstupní signál s informací o intenzitě záření do řídicí jednotky přístroje.



Obrázek 21 Schéma fotonásobiče

Počet dynod je vždy dán určitým typem fotonásobiče. Díky tomuto násobení je tedy při různých aplikacích možno detekovat záření o nízkých intenzitách.



Fotonásobič byl vynalezen v polovině dvacátého století a princip jeho fungování se do dnešní doby prakticky nezměnil, pouze se postupem času zdokonaloval.

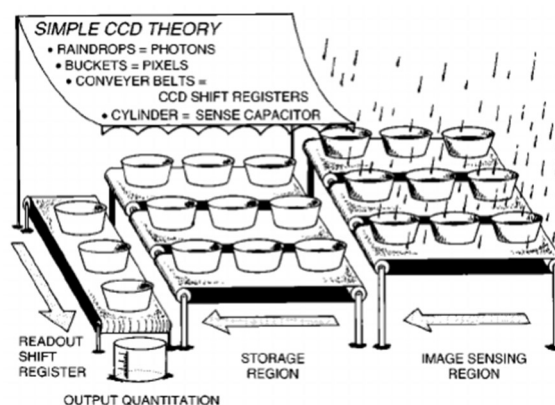


Obrázek 22 Příklad současného provedení fotonásobiče od firmy Hamamatsu [19]

### 2.2.3.3. CCD (Charge-coupled device)

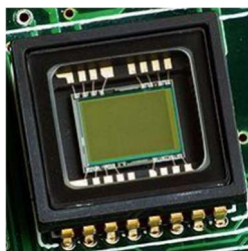
CCD patří do skupiny detektorů s vnitřním foto efektem a je používáno k detekci intenzity záření například u vláknových spektrometrů, jak bylo zmíněno viz výše v diplomové práci. Tyto detektory mají výhodu oproti již zmíněným, že je jejich výstupem digitální signál. Fungují totiž také na jiném principu, než kterým je princip: fotokatoda + anoda.

Princip měření pomocí CCD bych chtěl demonstrovat na **obrázku 22** viz níže. Kapky deště reprezentují dopadající fotony světelného záření a kyblíčky jednotlivé pixely, na které fotony dopadají.



Obrázek 23 Zjednodušené schéma CCD [20]

V průběhu dopadání fotonů na jednotlivé pixely se v nich akumuluje elektrický náboj. Poté, co jsou pixely nábojem plně nasyceny, tak se tento náboj přesune na pixely, v kterých se uchová, dokud není uložen do zásobníkového registru. Z tohoto registru následně putuje na výstup CCD, kde je příslušným převodníkem převeden na digitální signál.

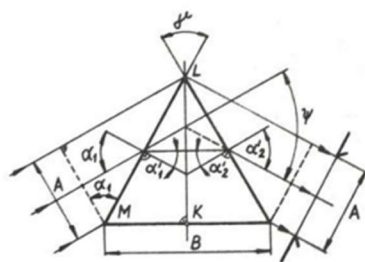


Obrázek 24 Příklad detektoru CCD [20]

CCD detektory mají poměrně omezenou fotocitlivou plochu pro dopadající záření. Je tedy nutné mít měřené záření přesně nasměrované do této oblasti, jinak je detekce intenzity neúspěšná.

#### 2.2.3.4. Optický hranol

Optický hranol se v přístrojích používá jako disperzní zařízení. Pro měření v ultrafialové části světelného spektra je hranol vyráběn z křemene, pro viditelnou část z flintového skla, a pro infračervenou část z chloridu sodného. Typicky se volí hranol s vrcholovým úhlem  $\gamma = 60^\circ$ . [21] Pro popis disperze světelného paprsku na hranolu slouží rovnice níže.



Obrázek 25 Detailní popis rozměrů a úhlů optického hranolu [21]

$$\alpha_1 = \alpha_2' \quad (1) \qquad \alpha_1' = \alpha_2 = \frac{\gamma}{2} \quad (2)$$

$$\sin(\alpha_1) = n \cdot \sin(\alpha_1') \quad (3) \qquad n \cdot \sin(\alpha_2) = \sin(\alpha_2') \quad (4)$$

$$\frac{d\Psi}{dn} = \frac{2 \cdot \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right)}{\sqrt{1 - n^2 \cdot \sin^2\left(\frac{\gamma}{2}\right)}} \quad (5)$$

$\Psi$  [°] – uhlová odchylka (mezi vstupujícím a vystupujícím svazkem)

$\alpha_1$  [°] – úhel dopadu vstupujícího svazku

$\alpha_2$  [°] – úhel výstupu vystupujícího svazku

$n$  [–] – index lomu materiálu hranolu

$\gamma$  [°] – vrcholový úhel

Jakým způsobem se budou jednotlivé vlnové délky lámat po průchodu optickým hranolem, udává úhlová disperze. Úhlovou disperzi je možno vypočítat pomocí matematického vztahu viz níže.

$$D = \frac{d\Psi}{d\lambda_0} = \frac{2 \cdot \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right)}{\sqrt{1 - n^2 \cdot \sin^2\left(\frac{\gamma}{2}\right)}} \cdot \left(\frac{dn}{d\lambda_0}\right) \quad (6)$$

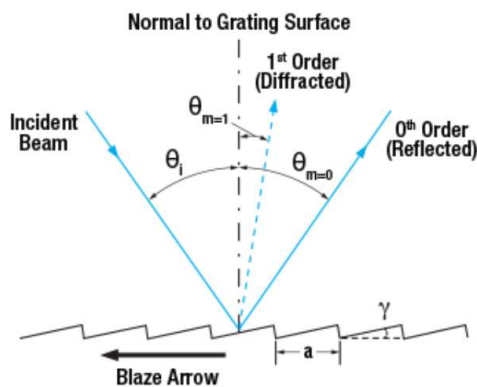
$D$  [-] – úhlová disperze

$\lambda_0$  [nm] – vlnová délka

Díky úhlové disperzi můžeme pozorovat, že se krátké vlnové délky lámou více než delší, protože mají větší index lomu, a proto se modrá barva objeví pod největším úhlem lomu a červená pod nejmenším.

#### 2.2.3.5. Optická mřížka

Na optické mřížce dochází k rozkladu světelného svazku na jeho spektrum a je v současné době velmi využívaným disperzním zařízením v optických přístrojích. Pro názornost principu difrakce světla na mřížce zde uvedu základní vzorce a schéma jejího průběhu.



Obrázek 26 Difrakce světla na optické mřížce [7]

$$\sin(\theta_m) - \sin(\theta_i) = \frac{j \cdot \lambda}{d} \quad (7)$$

$\theta_i$  [°] – úhel dopadu

$\theta_m$  [°] – úhel ohybu

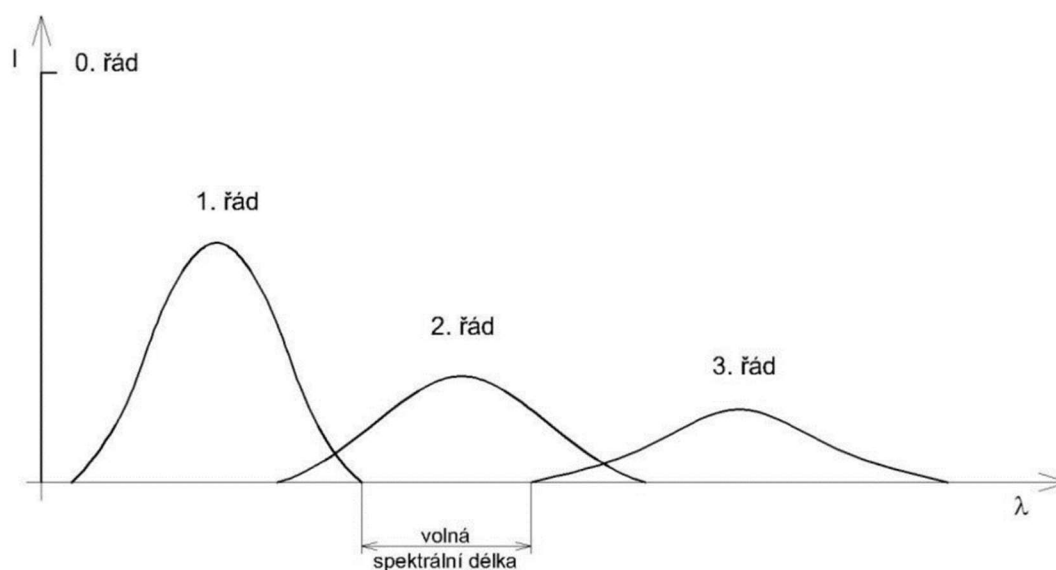
$j$  [-] – řád spektra

$\lambda$  [nm] – vlnová délka

$d$  [ $\mu\text{m}$ ] – mřížková konstanta (rotzeč štěrbin na mřížce)

Jednotlivé vlnové délky se odchyľují rozdílným způsobem než při disperzi v hranolu. Čím větší je vlnová délka záření, tím větší je úhel ohybu. Rozklad světla na mřížce je založena na ohybu na periodické struktuře a nikoliv na disperzi v materiálu, jako je tomu u hranolu.

Při disperzi světla na optické mřížce se může vyskytnout určitý problém týkající se řádu spektra. Mohou se překrývat jednotlivá spektra vyšších řádů a nemusí být jasné, jakou vlnovou délku zrovna měříme. Zároveň na detektoru můžeme měřit zvýšené intenzity z důvodu překrývání jednotlivých záření.



Obrázek 27 Překrývání spekter vyšších řádů [21]

$$j_1 \cdot \lambda_1 = j_2 \cdot \lambda_2 \quad (8)$$

V prvním řádu můžeme například detekovat vlnovou délku o hodnotě  $\lambda_1 = 900 \text{ nm}$ , v druhém řádu  $\lambda_2 = 450 \text{ nm}$  a ve třetím  $\lambda_3 = 300 \text{ nm}$ . Všechny tyto  $\lambda$  se budou šířit do stejného směru. Takový problém by nám mohl pokazit celé měření a je nutné nepotřebné řády nějakým způsobem odstranit. Pro malé řády existují absorpční filtry nebo skleněná optika. Vyšší vlnové délky se dají odstranit citlivostí detektoru. V případě odstranění vyšších řádů je možné použít například ultrafialový filtr.

Volnou spektrální délkou se rozumí vzdálenost mezi spektry různých řádů. Pro výpočet této délky se používá matematický vztah viz níže.

$$\Delta\lambda \approx \frac{\lambda}{j} \quad (9)$$

$\Delta\lambda$  – volná spektrální délka [nm]

### 2.3.Souhrn teoretické části

Spektroskopie je fyzikální obor, který se zabývá rozkladem světla na světelné spektrum a věnuje se jeho vlastnostem. Na druhé straně spektrometrie je praktické využívání spektroskopie pro provádění určitých měření za pomoci přístrojů, které se nazývají spektrometry.

Spektrometry tedy využívají principů spektroskopie a na jejich základech uživatel provádí nedestruktivní zkoušky materiálu, kde se pomocí světelného spektra odhaluje chemické složení a vlastnosti měřeného vzorku.

Základní používané komponenty ve spektrometrech jsou: světelný zdroj (halogenový, deuteriový), vstupní štěrba, kolimátor, disperzní prvek (mřížka, hranol), kamera a detektor (fotonásobič, fotonka, CCD).

Výstupem měření na spektrometru je spektrální charakteristika měřeného vzorku, kde můžeme pozorovat závislost intenzity záření na vlnové délce.

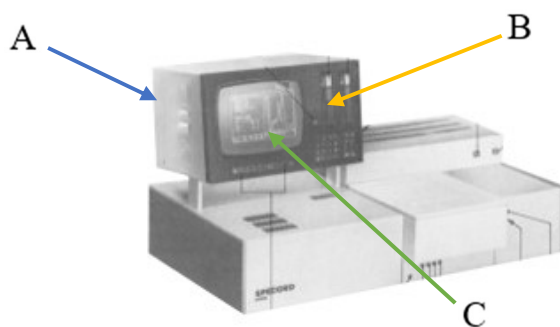
### 3. Praktická část

Praktická část mé diplomové práce se zaměřuje na modernizaci starého spektrometru, u kterého byla nefunkční řídicí jednotka s počítačem. Modernizaci jsme prováděli ve dvojici s mým kolegou Bc. Lukášem Bláhou, jak bylo uvedeno v úvodu a abstraktu diplomové práce. Text níže bude pojednávat o hardwarové části modernizace spektrometru s detailním popisem použitých původních i nových komponent. Zároveň bude uvedeno vzájemné propojení součástí a princip nového ovládání spektrometru.

V závěru praktické části jsem ověřil správné fungování modernizovaného spektrometru pomocí provedeného experimentu, kde jsem se pokusil o změření a uložení kompletní spektrální charakteristiky.

#### 3.1. Modernizovaný spektrometr Specord M42/400

Spektrometr, na kterého modernizaci jsem se podílel byl vyráběn firmou německou firmou Carl Zeiss Jena v osmdesátých letech dvacátého století. Tato firma byla vždy a stále je velmi kvalitním výrobcem optických zařízení i mimo výrobu spektrometrů.



Obrázek 28 Specord M42/400 [22]

Specord M42/400 byl řízen připojeným počítačem (A) a byl to první model spektrometru od firmy Carl Zeiss Jena řízený právě tímto způsobem. V historické podkapitole této práce jsem zmínil, že tento model spektrometru byl jen vylepšený předcházející model (viz **obrázek 11**). Součástí počítače bylo čtecí zařízení pro tak zvané floppy disky (B) a hlavním vylepšením byla obrazovka pro zobrazení ovládacího rozhraní (C).

Tento spektrometr byl na svou dobu opravdu kvalitním zařízením. Zároveň také z tohoto důvodu jsem se pustil do modernizačních prací, protože se v něm nachází optika kvalitou srovnatelná s tou dnešní.

Pro přiblížení výkonnosti a přesnosti spektrometru zde uvedu jeho původní základní specifikaci viz níže.

Základní specifikace Specord M42/400	
Rozsah vlnových délek $\lambda$ :	185-900 nm
Přesnost měření $\Delta\lambda$ :	$\pm 0,3$ nm
Mřížková konstanta disperzní mřížky	$d = 1400$ vrypů na mm
Optimální pracovní teplota:	18°C - 28°C
Světelné zdroje:	Deuteriová lampa 350 V 0,3 A Halogenová lampa 6 V 3,3 A
Detektor:	Head-on fotonásobič s průměrem $\text{ØD}=50$ mm

Tabulka 2 Základní specifikace spektrometru Specord M42/400

## 3.2. Počátek modernizace

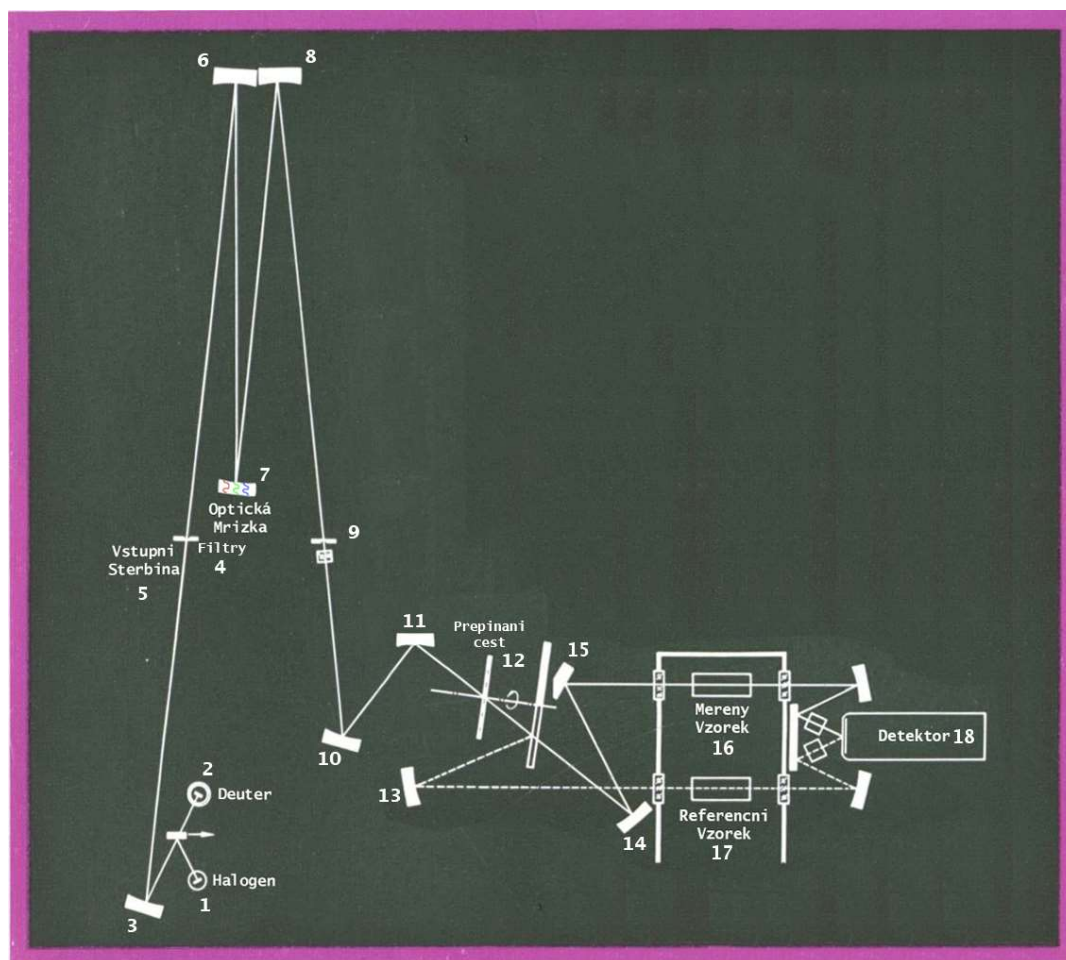
### 3.2.1. Princip fungování Specordu M42/400

V počátku modernizace jsem se zaměřil nejprve na identifikaci optické cesty světelného svazku, kterou bylo nutné zmapovat, od jejího počátku (světelný zdroj) až do jejího konce (detektor).

Při popisu této cesty se budu číselnými označeními odkazovat na **Obrázek 28** s optickým schématem. Na počátku cesty se tedy nachází světelný zdroj (Halogenový **č. 1**, Deuteriový **č. 2**), který paprsek vyzáří. Pro přepnutí mezi jednotlivými typy světelných zdrojů se používá motor, který vždy zakryje nepoužívaný světelný zdroj neodrážející stranou zrcátka **č.3**.

Paprsek poté pokračuje do míst s nastavitelnými světelnými filtry **č. 4**. Filtrů je šest a jsou součástí disku, kterým otáčí další motor. Po průchodu filtrem světelný paprsek putuje dále nastavitelnou vstupní štěrbinou **č. 5** a odráží se od zrcadla, které reprezentuje kolimátor **č. 6**. Za kolimátorem pokračuje rovnoběžný svazek k optické mřížce **č. 7**. Světlo se rozdělí na spektrum a putuje na zrcadlo, kterým je kamera **č. 8**, která fokusuje záření o určité vlnové délce do nastavitelné výstupní štěrbině **č. 9**.

Následují další odrazy na zrcadlech **č. 10** a **č. 11**, než paprsek doputuje do místa, kde probíhá nastavení směru jeho cesty **č. 12** pomocí dalšího motoru, který otáčí se speciálně tvarovaným zrcadlem. Paprsek může po odrazech na zrcadlech **č. 14** a **č. 15** procházet při jednom nastavení buďto měřeným vzorkem **č. 16** a při druhém zas referenční větví **č. 17**. Po průchodu vzorkem paprsek dopadá do detektoru **č.18** a je vyhodnocena jeho intenzita.



Obrázek 29 Schéma optické cesty světelného paprsku – Specord M42/400  
(editované schéma staršího Specordu [15])

### 3.2.2. Fotografie rozebíraného Specordu M42/400

V této podkapitole bych chtěl přiblížit, jakým způsobem spektrometr vypadal po demontáži krycích plechů. Tyto fotografie jsou nutné k výslednému porovnání stavů před a po modernizaci.



Obrázek 31 Pohled na připojený původní fotonásobič



Obrázek 30 Pohled na původní řídicí elektroniku



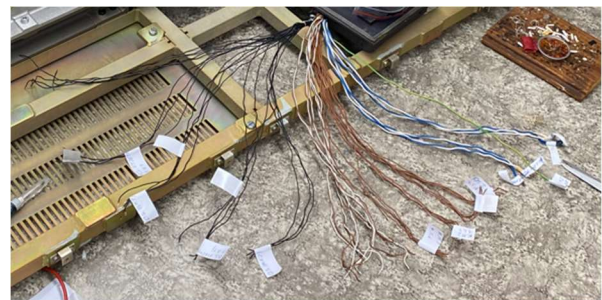


Obrázek 32 Demontáž krytu řídicí elektroniky

Identifikace elektronických součástí přístroje probíhala v počáteční fázi primárně rozpoznáním jednotlivých vodičů a jejich přiřazením k příslušné elektronice.



Obrázek 34 Fotografie před rozpoznáním jednotlivých vodičů

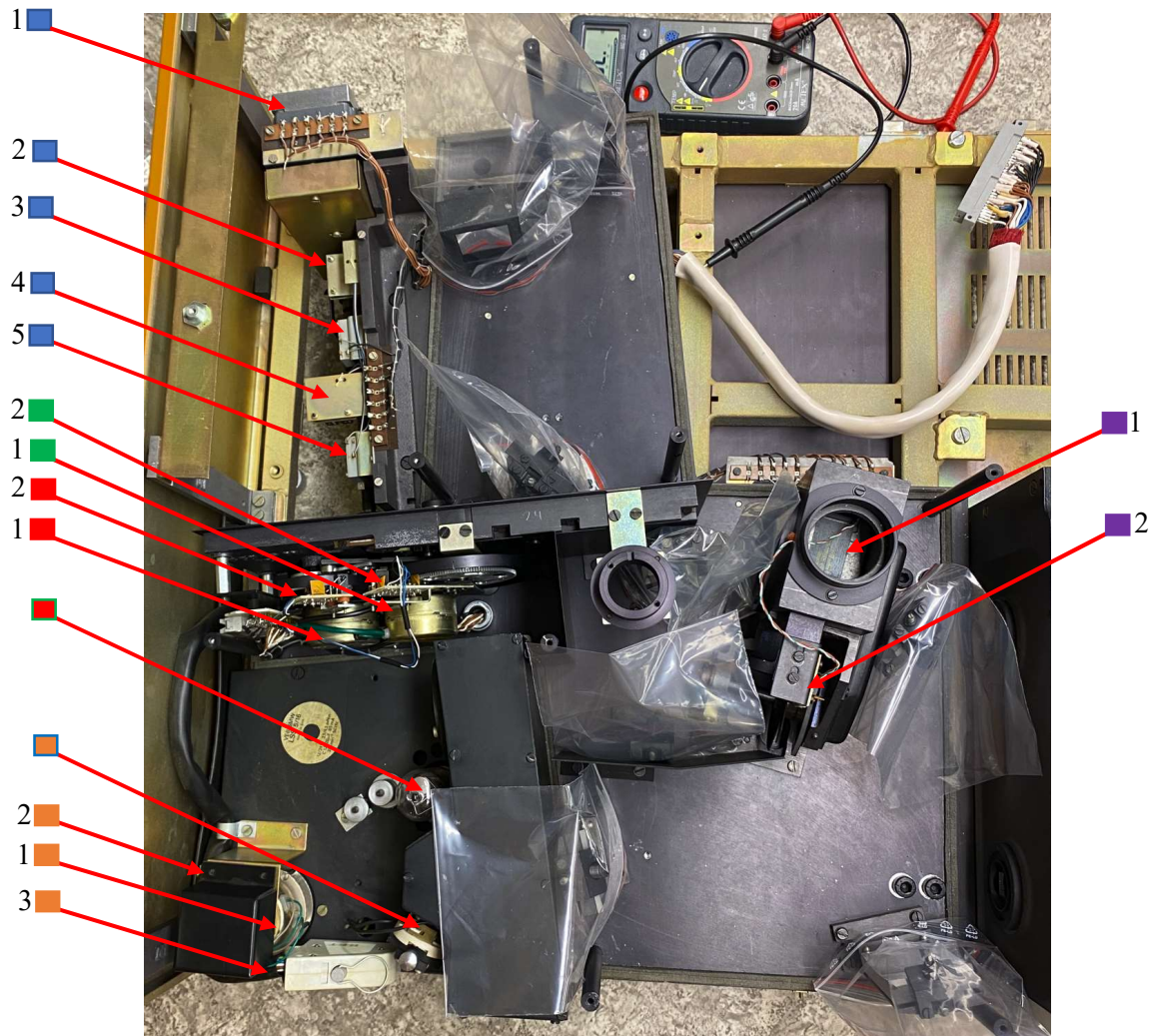


Obrázek 33 Fotografie po rozpoznání jednotlivých vodičů

### 3.3. Součásti Specordu M42/400

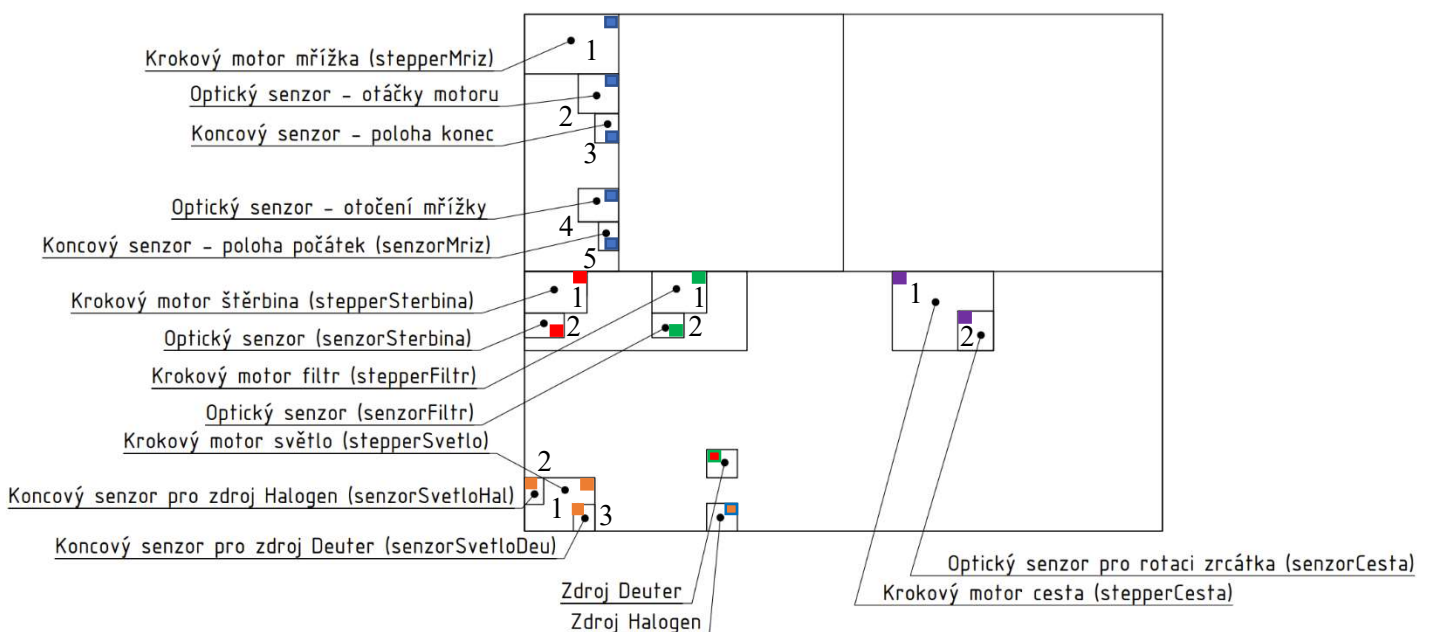
Ovládané součásti spektrometru jsou popisovány podle jejich umístění v konstrukci přístroje. Označení umístění každé součásti je demonstrováno odkazem na schéma optické cesty spektrometru nebo na celkové schéma použitých součástí (**Obrázek 35**), které byly při demontáži identifikovány.

Dále pro správné pochopení rozložení identifikovaných součástí zde uvedu reálnou fotku místa optické cesty, a poté přehledné schéma ovládaných součástí, které fotku reprezentuje i s příslušnými popisky.



Obrázek 35 Fotografie místa optické cesty spektrometru

## Schéma elektroniky v místech optické cesty



Obrázek 36 Schéma popisující identifikované součásti v místech optické cesty spektrometru

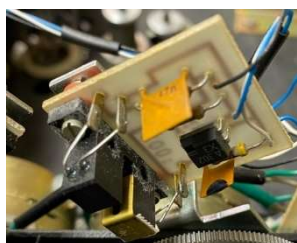
Všechny součásti spektrometru budou detailněji popsány v nadcházejících podkapitolách. Zároveň bude upřesněn jejich název, zkratka a zda byla součást ve výsledku použita či nikoli. V závorkách u konkrétních součástí je tučným písmem napsán pracovní název pro řídicí software.

### 3.3.1. Prostor optické cesty

#### 3.3.1.1. Senzory

- Optické senzory – původní (OSP)

Jedná se o optické senzory, kterých je součástí optická závora. Touto optickou závorou prochází určité objekty, které při průchodu přerušují světelný paprsek. Po přerušení tohoto paprsku se na výstupu senzoru změní hodnota z logické 0 na logickou 1.



Obrázek 37 Původní optický senzor

OSP: připojení			
Vodič (barva):	Modrá	Černá	Bílá
Funkce:	Signál	VCC 3,3V	GND

Tabulka 3 Popis jednotlivých vodičů původního optického senzoru

- Optické senzory – nové (OSN)

Tyto optické senzory fungují na úplně stejném principu jako senzory původní. V mém případě bylo potřeba vyměnit pouze jeden původní senzor za nový z důvodu jeho nefunkčnosti.



Obrázek 38 Nový optický senzor [30]

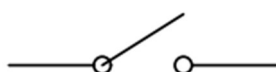
OSN: připojení			
Vodič (barva):	Bílá	Červená	Zelená
Funkce:	GND	VCC 3,3V	Signál

Tabulka 4 Popis jednotlivých vodičů nového optického senzoru

- Koncové senzory (KS)

Všechny použité koncové senzory jsou původní a žádný z nich nebyl potřeba vyměnit za nový. V konstrukci spektrometru se vyskytují dva typy koncových senzorů, ale liší se pouze jejich velikostí. Způsob zapojení a provozu je stejný.

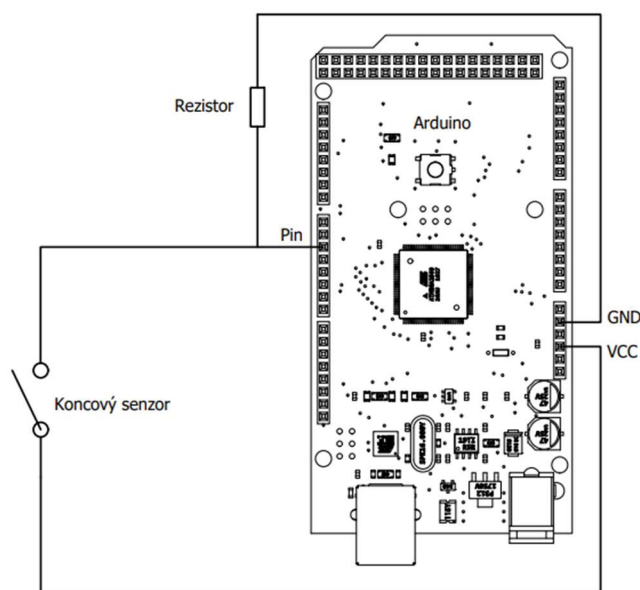
U těchto senzorů se vyskytují pouze dva vodiče. Nezáleží na tom, jak jsou připojeny. Tím je myšleno to, který z nich reprezentuje VCC a který GND. V principu jde o pouhý spínač. Důležité je však zapojení, pokud z něj chceme číst logické hodnoty přiřazené sepnutému (logická 1) a rozepnutému (logická 0) stavu. Takový senzor se připojí jedním vodičem do VCC pinu (5 V nebo 3,3 V), druhý přes odpor do GND pinu a zároveň do příslušného pinu řídicí jednotky, kde chceme vyčítat logické hodnoty. Názorné schéma zapojení a schématická značka koncového senzoru viz níže.



Obrázek 40 Schématická značka koncového senzoru



Obrázek 39 Fotografie použitého koncového senzoru

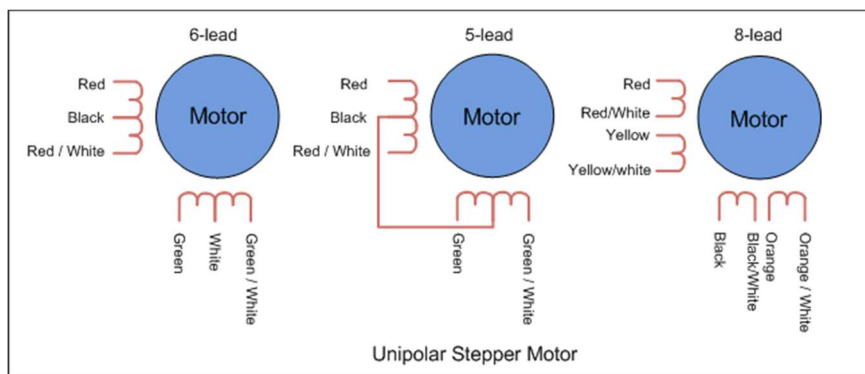


Obrázek 41 Schéma příkladu zapojení koncového senzoru

### 3.3.1.2. Krokový motor mřížka (pracovní označení: **stepperMriz**)

Krokový motor používaný k otáčení optické mřížky byl identifikovaný jako unipolární. Tato skutečnost byla potvrzena tím, že je motor připojen šesti vodiči, nikoli jen čtyřmi. To, že je krokový motor unipolární je tedy dáno právě tím, že jednotlivá vinutí na statoru motoru jsou ještě rozdělena v jejich polovině dalším vodičem.

Unipolární krokové motory mohou být připojeny i pěti nebo osmi vodiči, jde právě o to, jakým způsobem jsou jednotlivá vinutí na statoru motoru řešena. Názorná ukázka realizace unipolárních křokových motorů viz další strana.

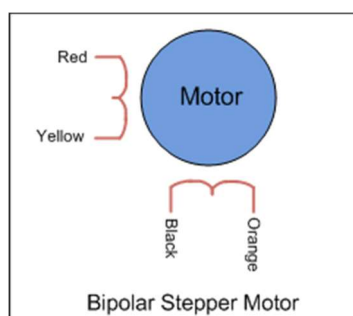


Obrázek 42 Typy realizace unipolárních krokových motorů [23]

U unipolárních krokových motorů je výhodou, že proud, resp. napětí, pracuje pouze s jednou polaritou, takže jsou jednodušší na řízení a nepotřebují tak složitý řídicí obvod. Nicméně disponují menším kroutícím momentem než motory bipolární.

V mém případě byla tato problematika vyřešena tak, že jsem pro řízení použil drivery určené k ovládání bipolárních krokových motorů (drivery jsou detailněji probírány v podkapitole **3.4.Současná řídicí elektronika**). Bylo to z toho důvodu, že tyto drivery mají nastavitelnou hodnotu výstupního proudu, což se přímo hodilo k identifikovanému motoru. Zjistil jsem totiž, že se unipolární krokové motory dají připojit jako motory bipolární vynecháním zapojení prostředních vodičů, dělicích cívky. Vzhledem k tomu, že je možné na driverech nastavit i velikost mikro krokování, tak jsem v řízení motoru nepřišel o požadovanou přesnost pohybu.

Bipolární motor disponuje větším kroutícím momentem než unipolární a zároveň musí být řízen proudem, resp. napětím, o proměnné polaritě, což zajišťují použité drivery.



Obrázek 43 Realizace bipolárního krokového motoru [23]

Vzhledem k uvedeným **obrázkům č. 41 a 42**, tak se zde vyskytují určité barvy jednotlivých vodičů, ale ty slouží pouze k demonstrativnímu účelu. Oranžově zbarvená vinutí jsou cívky uložené na statoru motoru, kde se při připojení napájení vytváří točivé magnetické pole, za kterým se otáčí magnet připojený na rotor. Na **obrázku 42** je tento magnet zobrazený jako nápis motor v modrém kruhu.

Konkrétním identifikovaným motorem je tedy unipolární krokový motor **Robotron SPA 52/60-5681**.



Obrázek 44 Robotron SPA 52/60-5681 [33]

Základní specifikace Robotron SPA 52/60-5681	
Vinutí:	Unipolární
Počet vodičů:	6
Napětí:	36 V
Proud:	0,6 A
Průměr hřídele:	ØD = 6 mm

Tabulka 5 Základní specifikace Robotronu SPA 52/60-5681

- Příslušné senzory:

1. OSP – otáčky motoru – **nepoužit**

Při každé otáčce motoru prochází optickou závorou část plechu, připevněna k závitové tyči, kterou motor otáčí. V optické závoře se při průchodu plechu přerušuje světelný paprsek, čímž se dají jednoduše počítat celkové otáčky motoru. V případě modernizace tento senzor nebyl nutný k používání. Kontrola otáček motoru je řešena softwarově pomocí knihovny na řízení krokový motorů.

2. KS – poloha konec – **nepoužit**

První koncový senzor, příslušící motoru stepperMriz, slouží k detekci jedné koncové polohy, mnou definované jako poloha konec. Jedná se o jednu z krajních poloh natočení optické mřížky. Senzor detekující tuto polohu nakonec nebyl použit, protože stačil pouze druhý KS k definování počáteční polohy. Od této počáteční polohy už se softwarově dopočítává vzdálenost pro potřebné natočení optické mřížky.

3. OSP – otočení mřížky – **nepoužit**

Jedná se o senzor sloužící k detekci posunu plechu, připojeného na otočnou závitovou tyč. Tento plech při otáčení motoru projíždí OSP a odesílá informaci o tom, zda se v něm plech nachází, či nikoli. Senzor opět nebyl potřeba ke správnému řízení natočení optické mřížky, protože je zde natočení jako v předešlém případě řešeno pouze softwarově od počáteční polohy.

4. KS – poloha počátek – **použit** (pracovní označení: **senzorMriz**)

Koncový senzor, mnou definovaný jako poloha počátek, slouží k definování počáteční polohy (HOME polohy) natočení optické mřížky. Od této polohy už se pomocí

naprogramovaného softwaru dopočítává vzdálenost, o kterou se má optická mřížka potočit při požadované vlnové délce měřeného záření.

### 3.3.1.3. Krokový motor cesta (pracovní označení: *stepperCesta*)

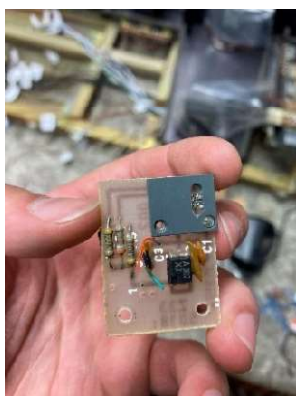
Krokový motor s označením stepperCesta slouží ke změně cesty světelného paprsku při průchodu jeho optickou cestou. Provádí se změna průchodu mezi měřenou a referenční cestou. K hřídeli tohoto motoru je připojeno zrcadlo specifického tvaru, aby bylo možné nastavit 3 různé stavy průchodu paprsku.

Jedná se o cesty typu: Referenční cesta, Měřená cesta, Žádná cesta.

Motor byl identifikovaný jako stejný typ, kterým je stepperMriz, tedy **Robotron SPA 52/60-5681**. Je zapojený identickým způsobem přes driver krokových motorů.

- Příslušné senzory
  1. Optický senzor pro rotaci zrcátka – **nepoužit**

Optický senzor, použitý pro detekci polohy rotačního zrcátka, které mění typ cesty světelného paprsku, byl řešený jiným způsobem než optická závora. Domnívám se, že pracoval na principu odrazu světelného paprsku. V případě, kdy se vyskytovalo zrcátko před senzorem, tak se od něj paprsek odrazil a dopadal do detektoru senzoru, čímž se na jeho výstupu objevila logická hodnota  $\rightarrow 1$ , příslušící stavu: Objekt detekován. V případě, kdy se paprsek nemohl od ničeho odrazit a dopadat do detektoru senzoru, tak senzor na výstupu uváděl logickou hodnotu  $\rightarrow 0$ , příslušící stavu: Objekt nedetekován.



Obrázek 45 Starý optický senzor (pohled z přední strany)



Obrázek 46 Starý optický senzor (pohled ze zadní strany)

Po hlubší analýze jednotlivých komponent, ze kterých byl senzor vyroben a po jeho otestování jsem dospěl k závěru, že je tento senzor nefunkční. Bylo tedy nutné senzor nahradit senzorem novým s optickou závorou.

## 2. OSN pro rotaci zrcátka – použit (pracovní označení: **senzorCesta**)

Nově nainstalovaný senzor s optickou závorou detekuje jednu určitou hranu specifického otočného zrcátka jako svou počáteční pozici (HOME poloha). Od této hrany je vždy dopočítávaný potřebný počet kroků motoru pro pootočení zrcátka do tří již zmíněných poloh (Typy cesty).

### 3.3.1.4. Krokový motor štěrbina (pracovní označení: **stepperSterbina**)

U dalších popisovaných motorů byla jejich identifikace poněkud složitější. I přes to, že byl k dispozici štítek s názvem motoru a s údaji o napájení.



Obrázek 47 Štítek motoru s příslušnými údaji

Základní specifikace VEB SMW LSS 5/16	
Vinutí:	Bipolární
Počet vodičů:	4
Napětí:	12/24 V
Proud:	85 mA
Frekvence:	50 Hz

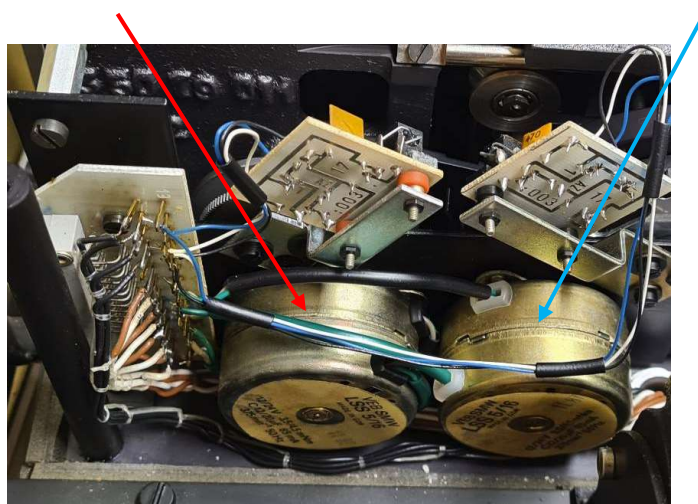
Tabulka 6 Základní specifikace VEB SMW LSS 5/16

Vzhledem k tomuto popisu se motor jeví tak, jako by měl být napájený střídavým napájením s použitím rozběhových kondenzátorů o příslušné kapacitě. Proto bylo nutné provést několik testů s příslušným zdrojem napájení a s kondenzátory. Motor byl vždy úspěšně uveden do pohybu, ale nebylo možné řídit jeho směr otáčení a rychlost. Testy motoru byly realizovány jen pomocí relé.

Tato skutečnost vedla k další hlubší analýze motoru, kdy bylo zjištěno, že frekvence, udána na štítku přísluší řídicím pulzům. Proto tedy motor nemá být napájen střídavým napájecím zdrojem, nýbrž příslušným driverem jako krokové motory. Typ tohoto motoru je totiž dvoufázový asynchronní motor (bipolární krokový motor).

Motor stepperSterbina slouží k otvírání a zavírání vstupní štěrbiny. Tato štěrbina redukuje množství procházejícího světla, které je potřebné k provedení určitého měření. Jeho připojení je realizováno úplně stejným způsobem jako u již popisovaných krokových motorů přes jeho čtyři vodiče. Umístění tohoto motoru je označeno červenou šipkou na **obrázku 47** viz další strana.





Obrázek 48 stepperSterbina a stepperFiltr uložené v konstrukci spektrometru

- Příslušné senzory:
  1. OSP – **použit** (pracovní označení: **senzorSterbina**)

Senzor kontroluje počáteční polohu (HOME poloha) procházejícího plechu optickou závorou. Tato poloha indikuje plné otevření vstupní štěrbinu pro propuštění veškerého světelného záření. Od této počáteční polohy je softwarově dopočítáván počet kroků motoru pro procentuální změnu otevření vstupní štěrbinu: 0-100% otevření.

#### 3.3.1.5. Krokový motor filtr (pracovní označení: **stepperFiltr**)

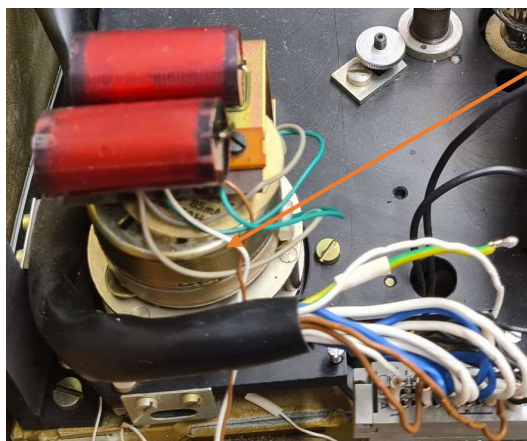
StepperFiltr (označen modrou šipkou na **obrázku 47**) se nachází v konstrukci spektrometru vedle motoru stepperSterbina a jedná se o identický typ motoru. Tento motor je použit k nastavení požadovaného světelného filtru. Na otočném kotouči, který je připojen na hřídel motoru se nachází šest filtrů. Světelné filtry slouží k odfiltrování záření o určitých vlnových délkách (konkrétní typy filtrů viz kapitola 3.5 Princip fungování modernizovaného spektrometru). Například se zde vyskytuje filtr, který propouští pouze záření v nižších vlnových délkách (modrá až ultrafialová část světelného spektra).

- Příslušné senzory:
  1. OSP – **použit** (pracovní označení: **senzorFiltr**)

OSP má nastavenou svou počáteční polohu (HOME poloha) u jednoho z šesti filtrů, kde je na procházejícím plechu optickou závorou detekovatelná značka pro senzor. Od tohoto konkrétního filtru je rozdělena celá otáčka motoru na určitý počet kroků a následně je opět softwarově dopočítáváno natočení motoru ke každému z filtrů

### 3.3.1.6. Krokový motor světlo (pracovní označení: **stepperSvetlo**)

Posledním identifikovaným a používaným motorem je stepperSvetlo. Opět se jedná o identický typ jako jsou předešlé dva popisované motory. Tento motor je používán ke změně světelného zdroje. Při jeho posunu z jedné krajní polohy do druhé je vždy přepínán světelný zdroj pomocí otočného zrcátka. Přepínání je realizováno mezi halogenovým a deuteriovým světelným zdrojem. Motor je označen oranžovou šipkou na **obrázku 48** viz níže.



Obrázek 49 stepperSvetlo

- Příslušné senzory:
  1. 2x KS – **použit** (pracovní označení: **senzorSvetloHal**, **senzorSvetloDeu**)

K detekci a definování dvou koncových poloh motoru, které udávají aktuálně používaný světelný zdroj, slouží dva koncové senzory. Koncové senzory dobře fungují při mechanické detekci polohy, ale v mém případě se zde vyskytl určitý problém. Po připojení a řízení motoru bylo zjištěno, že na vodičích připojených ke koncovým sensorům vzniká určité rušení.

Díky provedené hlubší analýze problému bylo zjištěno, že se nejspíše jednalo o vznikající parazitní indukčnosti. Tato skutečnost byla prokázána tím, že silové vodiče od motoru byly vedeny stejným svazkem jako signálové vodiče od koncových sensorů. V takovém případě se mezi vodiči vytvářela vzájemná indukčnost  $M$  a na signálových vodičích se indukoval úbytek napětí podle vztahu viz níže.

$$\Delta u_S = M \cdot \frac{di_M}{dt} \quad (10)$$

$\Delta u_S$  – úbytek napětí [V]

$M$  – parazitní indukčnost [H]

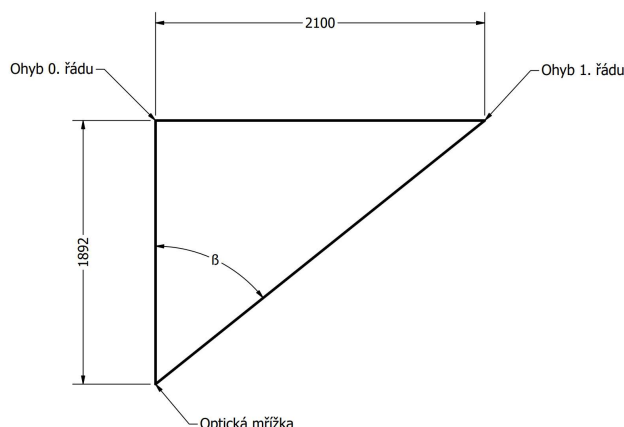
$i_M$  – proud vztačený k parazitní indukčnosti [A]

Bylo tedy potřebné oddělit silové a signálové vodiče a každý z nich vyvést jiným svazkem. Poté senzory souběžně s motorem fungovaly bez problému.

### 3.3.1.7. Optická mřížka

Disperzním prvkem v modernizovaném spektrometru je optická mřížka. Při identifikaci byl proveden výpočet, kvůli zjištění mřížkové konstanty. Při znalosti mřížkové konstanty by bylo možné dopočítávat hodnotu vlnové délky záření přes mřížkovou rovnici v případě, kdyby byla závislost změny  $\lambda$  na natočení mřížky nelineární. Proto bylo nutné zjistit potřebné údaje o optické mřížce pomocí měření s laserem o známe vlnové délce.

Mřížku byla osvětlena kolmo laserem, tedy pod úhlem dopadu  $\alpha = 0^\circ$ , což bylo kontrolováno v retroreflexi. Při měření byly zjištěny dvě vzdálenosti, které byly doplněny na trojúhelník s jedním z vrcholů v místě optické mřížky viz **obrázek 49**.



Obrázek 50 Měření k výpočtu mřížkové konstanty

Obě naměřené vzdálenosti byly použity k výpočtu úhlu  $\beta$ . Tento úhel reprezentuje úhel ohybu prvního řádu. Díky tomuto údaji jsem byl schopný dopočítat mřížkovou konstantu pomocí vztahů viz níže.

$$a = 2100 \text{ mm}, \quad b = 1892 \text{ mm}$$

$$\lambda_{\text{laser}} = 532 \text{ nm}$$

$$\beta = \left( \text{tg} \left( \frac{a}{b} \right) \right)^{-1} = \left( \text{tg} \left( \frac{2100}{1892} \right) \right)^{-1} = 47,983^\circ \quad (11)$$

$$d = \frac{\lambda_{\text{laser}}}{\sin(\beta)} = \frac{532}{\sin(47,983)} = 716,07 \pm 2 \text{ nm} \quad (12)$$

$$\text{Počet vrypů na milimetr: } \frac{1}{d} = \frac{1}{716,07 \pm 2} = 0,001396 \pm 0,000004 \text{ mm}^{-1} \quad (13)$$

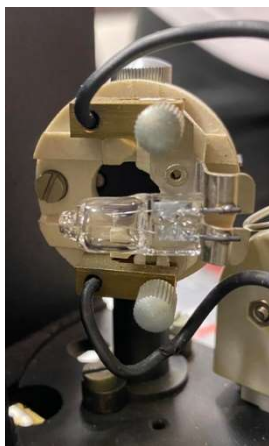
$$\rightarrow 1396 \pm 4 \text{ vrypů na milimetr}$$

Nejistota  $\pm 2$  nm byla do výpočtu zahrnuta z důvodu měření vzdáleností a, b pomocí svinovacího metru. Počet vrypů na mřížce byl porovnán s údajem v původní dokumentaci spektrometru, která byla dodána přímo z firmy Carl Zeiss Jena. Počet vrypů na mřížce udávaný v dokumentaci je roven 1400 vrypů na milimetr.

V průběhu následné kalibrace, při měření vlnové délky záření bylo zjištěno, že vztah mezi natočením mřížky a změnou vlnové délky detekovaného záření je lineární, tudíž mřížková konstanta není k měření na spektrometru potřebná.

### 3.3.1.8. Halogenový světelný zdroj

Hlavním využívaným světelným zdrojem ve spektrometru je halogenová žárovka. Tato žárovka obsahuje wolframové žhavicí vlákno, které je připojené ke zdroji napájení a uvnitř ní při sepnutí září halogenový plyn. Tato žárovka má rovnoměrně rozdělenou a spojitou spektrální charakteristiku, a proto je ideálním zdrojem k měření na spektrometru.



Obrázek 52 Halogenová žárovka

Halogenová žárovka	
U [V]	I [A]
6	3,3

Obrázek 51 Napájecí údaje halogenové žárovky

### 3.3.1.9. Deuteriový světelný zdroj

Druhým světelným zdrojem je deuteriová výbojka. V rámci modernizace spektrometru a této diplomové práce jsem se rozhodl, že se tento zdroj nebude využívat. Je to z toho důvodu, že je obtížné zdroj napájet a rozsvítit. K tomuto úkonu je potřebný externí driver, který zařídí prvotní nažhavení žhavicího vlákna a až poté se rozzáří vnitřní plyn. Driver je příliš drahý a pracuje s poměrně vysokým napětím. Proto bylo rozhodnuto, že k modernizačním pracím a následnému používání spektrometru zatím postačí pouze halogenová žárovka.

Deuteriová žárovka se používá k měření v ultrafialové oblasti spektra. Výsledný experiment bude prováděn ve viditelné oblasti, což představuje další důvod, proč není nutné tento zdroj využívat.



Obrázek 54 Deuteriová žárovka [24]

Deuteriová žárovka	
U [V]	I [A]
350	0,3

Obrázek 53 Napájecí údaje deuteriové žárovky

### 3.3.2. Detektor

Jedinou řízenou součástí nacházející se na konci optické cesty je detektor, sloužící pro detekci intenzity dopadajícího záření. Původním detektorem uloženým v konstrukci spektrometru byl fotonásobič. Vzhledem k absenci původní elektrické dokumentace a schémat s příslušným zapojením součástí byla nutná změna detektoru. I přes absolvovanou konzultaci ve firmě ECOM, která se specializuje na optické přístroje a další konzultaci s panem profesorem Papežem z elektrotechnické fakulty, který má s fotonásobiči určitou zkušenost, nebylo možné přijít na správné zapojení a řízení původního fotonásobiče.

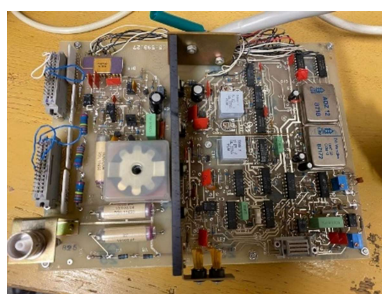


Obrázek 56 Původní fotonásobič (pohled z boku)



Obrázek 55 Původní fotonásobič (pohled na dopadovou plochu)

K fotonásobiči byla totiž připojena řídicí deska, z které nebylo patrné, jakým způsobem funguje a jak má být správně napájena. Nejspíše byl její součástí A/D převodník kvůli následnému zpracování naměřených dat a zároveň napěťový dělič k samotnému připojení fotonásobiče. Všechny tyto předpoklady byly pouhými domněnkami z důvodu absence elektrického schématu.



Obrázek 57 Původní řídicí deska fotonásobiče

Vzhledem také ke skutečnosti, že je původní fotonásobič už poměrně starý, tak jeho citlivost bude určitě nízká. Nejspíše by i při správném zapojení nevykazoval takovou přesnost měření, jako detektor nový.

### 3.3.2.1. Nový fotonásobič

Pomocí externího vláknového spektrometru byly naměřeny určité vlnové délky světelného záření v místě měřeného vzorku. Pro tyto vlnové délky byly naměřeny hodnoty výkonu wattmetrem. Na základě těchto naměřených hodnot byla vypracována specifikace nového fotonásobiče, který byl poptán ve firmě OptiXs. Poptávanými položkami mimo fotonásobiče byla i elektronika ke zpracování signálu a napájecí zdroj.

Poptávka fotonásobiče				
Pozice:	Název:	Specifikace:	Citlivost:	
1.	Fotonásobič s detektorem	Rozsah vlnových délek: 200 nm - 1000 nm, průměr dopadové plochy: 50 mm	Naměřena (bez vzorku):	
			$\lambda$ [nm]	P [ $\mu$ W]
			723	1,5
			658	1,6
			500	1,8
			407	0,7
			Potřebná (alespoň 1/1000 z naměřené):	
			$\lambda$ [nm]	P [ $\mu$ W]
			723	0,0015
			658	0,0016
500	0,0018			
407	0,0007			

Tabulka 7 Poptávka fotonásobiče

Byly nabídnuty dva typy fotonásobičů vyrobeny firmou Hamamatsu v Japonsku. Oba tyto fotonásobiče s příslušnou elektronikou a napájením se cenově pohybují kolem 100 000 Kč a doba dodání trvá kolem jedenácti týdnů. Proto bylo rozhodnuto tento typ detektoru nepoužít. Přistoupilo se tedy k využití alternativního typu detektoru, kterým je wattmetr.

V případě, že by bylo rozhodnuto o budoucím vylepšení spektrometru a byla by vyžadována výměna detektoru, tak zde uvedu konkrétní cenovou nabídku fotonásobičů a jejich příslušenství.

Položka	Popis	Cena [Kč bez DPH]	Předpokládaný termín dodání
R669	Photomultiplier tube R669 (fotonásobič)	29 580,32 Kč	cca 7 týdnů
E1435-02-Y001	D-type socket assembly for R669 (patice fotonásobiče)	13 107,50 Kč	cca 11 týdnů
R2257	Photomultiplier tube R2257 (fotonásobič)	42 318,12 Kč	cca 6 týdnů
E5859-01	D-type socket assembly for R2257 (patice fotonásobiče)	10 780,00 Kč	TBD
C9727-01	HV power supply for both PMTs (napájecí zdroj)	60 637,50 Kč	TBD
	Dopravné, balné a pojištění	1 103,00 Kč	

Tabulka 8 Cenová nabídka fotonásobičů od firmy OPTIX

### 3.3.2.2. *Wattmetr*

Jako finální detektor pro modernizovaný spektrometr byl použit wattmetr od firmy Thorlabs s označením PM100D. Wattmetr je vlastněn Strojní fakultou ČVUT, takže k němu bylo nutné zakoupit pouze příslušný senzor, který měří výkon záření v požadovaném rozsahu vlnových délek. Zakoupeným senzorem je fotodioda s označením S120VC.



Obrázek 59 Wattmetr PM100D



Obrázek 58 Fotodioda S120VC [31]

Základní specifikace PM100D	
Display:	LCD 320 x 240 pixelů, LED podsvícení
Kompatibilní senzory:	např. Fotodiody, Infratermočlánky
A/D převodník:	16 bit
Optimální pracovní teplota:	-10°C - 80°C
Výstup:	Analog: 0 - 2V Digital: Mini USB/USB 2.0
Přesnost analogového výstupu:	±3%

Tabulka 9 Základní specifikace PM100D

Základní specifikace S120VC	
Typ detektoru:	Silikonová fotodioda - rozšířena o detekci UV záření
Rozsah vlnových délek:	200 nm - 1100 nm
Rozsah měřitelného výkonu:	50 nW - 50 mW
Linearita:	±0,5%
Rozlišení:	1 nW
Přesnost analogového výstupu:	±3% (440 - 980 nm) ±5% (280 - 439 nm) ±7% (200 - 279 nm, 981 - 1100 nm)

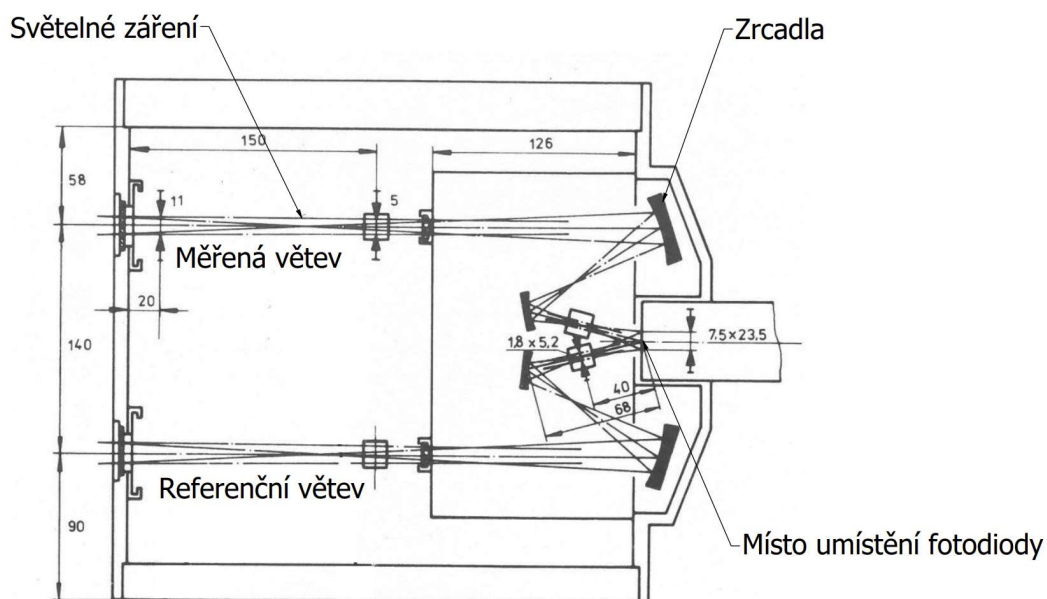
Tabulka 10 Základní specifikace S120VC

Připojení fotodiody k wattmetru je realizováno přes příslušný konektor, který je přímo součástí fotodiody (C-Series Connector viz **obrázek 57**).

Výhodou wattmetru je samostatný display, na kterém je možné kontrolovat měřený výkon záření v reálném čase. To bylo velmi nápomocné při porovnávání výsledků zobrazených na wattmetru s výstupními daty odesílanými po sériové komunikaci řídicí elektroniky spektrometru, jestli vše funguje tak, jak má. Další výhodou je digitální výstup wattmetru, protože je možné signál softwarově zpracovávat bez externího A/D převodníku. Kdyby byl použit fotonásobič nebo nějaký jiný detektor jen s analogovým výstupem, tak by externí A/D převodník nutný byl.

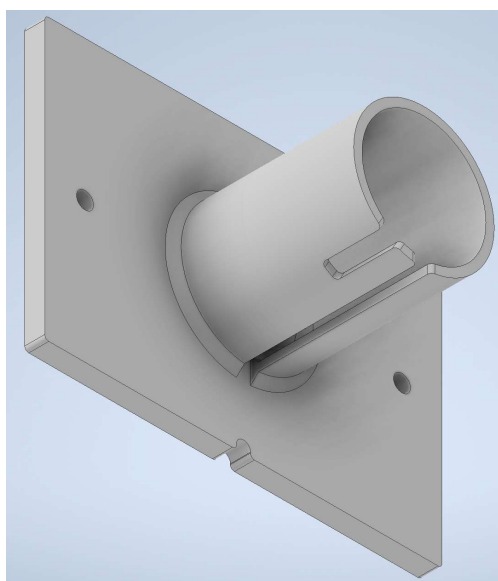
Vzhledem k tomu, že původním detektorem byl fotonásobič a nově použitá fotodioda má úplně jiné rozměry a tvar, tak bylo nutné navrhnout adekvátní držák, pomocí kterého se senzor umístí do konstrukce spektrometru. Umístění senzoru je promyšleno tak, aby se jeho

dopadová plocha nacházela na konci optické cesty v průsečíku světelných záření, které procházejí měřenou a referenční větví. Pro názornost zde uvedu obrázek reprezentující průběh světelného záření na konci optické cesty a označím zde umístění fotodiody.



Obrázek 60 Místo uložení nové fotodiody s popisky

Uchycení fotodiody je vyřešeno pomocí 3D tištěného držáku. Držák je přimontován dvěma šrouby v místě původního krytu fotonásobiče. Součástí držáku je válcovitá část, která zajišťuje držení fotodiody ve správném místě střetu jednotlivých záření. Ve válcové části je vytvořena jedna drážka pro připojovací kabel a druhá pro přišroubování fotodiody šroubem velikosti M4. Celková plocha držáku zajišťuje, aby se k fotodiodě nedostalo žádné parazitní světlo. Uzavírá tedy celý prostor pro její uložení.



Obrázek 61 Držák fotodiody

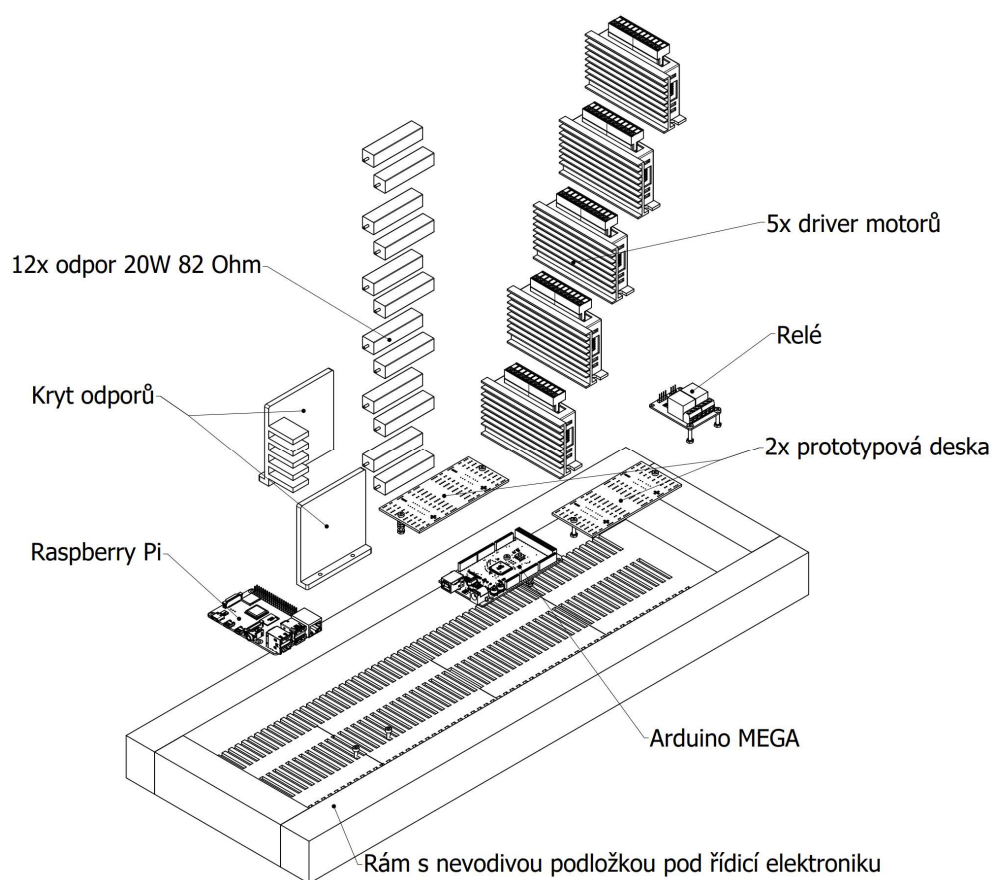


### 3.4. Současná řídicí elektronika

Celková současná řídicí elektronika je uložena v místech té původní. Její rozměry byly oproti staré řídicí elektronice (viz **obrázek 31**) značně redukovány. Princip řízení spektrometru je primárně založen na ovládacím prvku (Arduino MEGA), který ovládá elektronické komponenty a poté na řídicím hlavním prvku (Raspberry Pi), z kterého se posílají příkazy pro pohyb elektronických součástí a zpracovávají se v něm jednotlivá měření. Arduino vždy odesílá Raspberry Pi zprávu o dokončení požadavku. Raspberry Pi a Arduino spolu operují jako master (hlavní řídicí prvek) a slave (podřízený ovládací prvek).

K Arduino je připojeno pět driverů používaných k řízení motorů přes příslušné řídicí piny. U tří driverů je připojeno dvanáct externích odporů z důvodu snížení řídicího proudu. Dále se v řídicí elektronice nacházejí dvě prototypové desky, které zajišťují připojení veškerých senzorů. V poslední řadě je použito relé ke spínání světelného halogenového zdroje. V následujících podkapitolách bude každá součást současné řídicí elektroniky popsána detailněji. Tento uvedený popis je pouze obecný.

Níže uvedu rozpad současné řídicí elektroniky, kde jsou přehledně zobrazeny všechny použité součásti s popisky.



Obrázek 62 Rozpad současné řídicí elektroniky s popisky

### 3.4.1. Raspberry Pi

Používaným typem je Raspberry Pi 4 model B. Základní specifikace viz níže.



Obrázek 63 Raspberry Pi 4 model B [32]

Základní specifikace Raspberry Pi 4 model B	
Procesor:	Broadcom BCM2711, Quad core Cortex-A72 (ARM v8) 64-bit SoC @ 1.8GHz
Paměť RAM:	4 GB LPDDR4-3200 SDRAM
Počet GPIO pinů:	Raspberry Pi standard 40 pin GPIO header 3 V logika
USB porty:	2x USB 3.0 port; 2x USB 2.0 port
HDMI porty:	2 x micro-HDMI port
Hard disk:	Micro-SD card slot
Doporučené napájecí napětí a napájení:	U = 5 V Type-C port GPIO: 5V, GND

Tabulka 11 Základní specifikace Raspberry Pi 4 model B

Jak již bylo zmíněno, tak Raspberry Pi reprezentuje roli řídicího počítače. Je to z toho důvodu, že se řadí do skupiny mikro počítačů. Mikro počítače lze používat jako běžné stolní nebo přenosné počítače. Vzhledem k malým rozměrům bylo Raspberry Pi vhodné pro použití místo klasického počítače z důvodu redukce velikosti původní řídicí elektroniky.

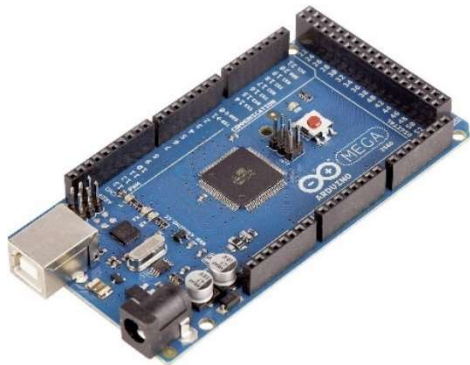
Součástí Raspberry Pi je GPIO (General-purpose input/output) rozhraní, které je v tomto případě k řízení spektrometru nevyužíváno. Jedinou součástí připojenou přes toto rozhraní je chladicí ventilátor uložený v krytu mikro počítače. Přes USB porty jsou k němu připojeny klávesnice, myš, Arduino a wattmetr PM100D. Pomocí portu micro-HDMI je k Raspberry Pi připojen monitor. Pro ovládání spektrometru bylo díky počítačovým perifériím vytvořeno příslušné pracoviště s ovládacími (klávesnice, myš) a zobrazovacími prvky (monitor).

Vzhledem ke skutečnosti, že se jedná o počítač, tak je v Raspberry Pi nahraný řídicí software, který je ovládán pomocí vizuálního prostředí (GUI) zobrazeného na monitoru. Řídicí software zároveň zpracovává naměřená data, která jsou přijímána z wattmetru PM100D.

### 3.4.2. Arduino

Používaným typem je Arduino MEGA. Pracuje v sérii s Raspberry Pi jako jeho slave. Princip master a slave komunikace byl vysvětlen v obecném popisu fungování současné řídicí elektroniky výše v textu. Arduino patří do skupiny mikro kontrolérů. Mikro kontroléry jsou jednočipové počítače, které lze naprogramovat, aby plnily určité funkce. Nemohou nám ale poskytnout složitější funkce, jako mikro počítače, například používat operační systém, používat počítačové periférie a programovat řídicí software přímo na zařízení. V případě této

diplovové práce bylo vhodné Arduino použít z důvodu rozšíření řídicích pinů, protože na samotném Raspberry Pi by jich nebyl pro řízení spektrometru dostatek. Zároveň Arduino pracuje na 5 V logice jednotlivých pinů (viz **tabulka 12**), kterou ke svému řízení vyžadují použité drivery motorů.



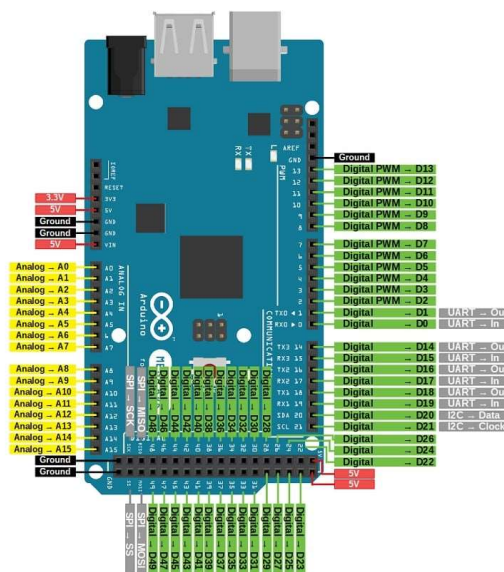
Obrázek 64 Arduino MEGA [34]

Základní specifikace Arduino MEGA	
Procesor:	ATmega2560
Flash paměť:	256 kB
Počet GPIO pinů:	54 pinů (15 pinů s výstupem PWM) 16 analogových pinů 5 V logika
USB porty:	1x USB 2.0 A-B port
Doporučené napájecí napětí a napájení:	U = 7-12 V USB 2.0 A-B Napájecí konektor

Tabulka 12 Základní specifikace Arduino MEGA

K Arduino jsou připojeny veškeré senzory příslušící jednotlivým motorům. Všechny tyto senzory mají společné uzemnění (GND) a 3,3 V napájení (VCC) z Arduino, které je vyvedeno na prototypové desky. Z těchto senzorů Arduino získává potřebné informace, které jsou zpracovávány řídicím softwarem. Každý z driverů je k Arduino připojen přes tři řídicí piny. Detailnější popis driverů a jejich ovládání viz následující podkapitola.

Pro pozdější potřebu zde uvedu obrázek, na kterém je demonstrován popis jednotlivých pinů Arduino. Je to z toho důvodu, že součástí diplovové práce je také kompletní elektronické schéma zapojení jednotlivých komponent v současné řídicí elektronice (podkapitola **3.5.5. Elektronické schéma**).



Obrázek 65 Pinout Arduino MEGA [25]

### 3.4.3. Drivery motorů

Použitým typem driverů k řízení krokových motorů jsou drivery TB6600. Základní specifikace viz níže.

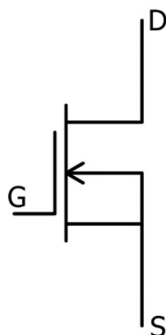


Obrázek 66 Driver TB6600

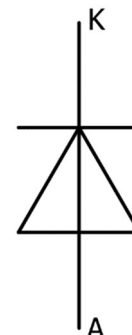
Základní specifikace TB6600	
Typ:	Bipolární H-můstek pro DC dvou fázové a čtyř fázové motory
Výstup:	8 možností výstupního proudu (0,5A - 4A)
Microsteps:	8 možností (NC, 1/2/A, 2/B, 4, 8, 16, 32)
Maximální frekvence řídicích pulzů:	20 kHz
Napájení:	U = 9 - 42V DC I = 4A

Tabulka 13 Základní specifikace TB6600

Každý, z již popsaných krokových motorů je řízen vlastním driverem TB6600. Drivery pracují na principu H-můstku, kdy je obvod složen z MOSFET tranzistorů, diod a je připojen na vinutí motoru přes příslušné vodiče. Tranzistor propouští elektrický signál pouze pokud je externím signálem sepnut a diody jsou propustné stále, ale pouze v jednom směru.



Obrázek 67 MOSFET tranzistor



Obrázek 68 Dioda

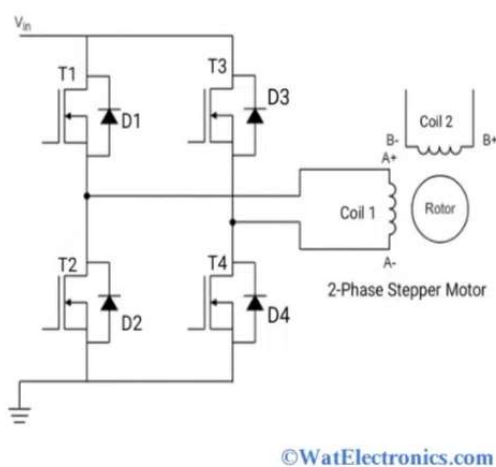
- MOSFET tranzistor

Tranzistor má tři základní označené části: G – gate, D – drain, S – source. Gate slouží k přivedení řídicího napěťového signálu pro sepnutí tranzistoru. Tím se nabije na řídicí elektrodě kapacita a tranzistor je sepnutý. Z místa, které je označené jako drain protéká elektrický signál do místa s označením source. V případě vypnutí tranzistoru je nutné kapacitu na řídicí elektrodě vybit. V sepnutém stavu se na tranzistoru indukují malý úbytek napětí a maximální spínací frekvence může dosahovat hodnot až  $f_{MAX} = 100 \text{ kHz}$ . Toto spínání je ale omezeno samotným driverem viz **tabulka 13**.

- Dioda

Dioda má označena dvě místa příslušnými písmeny. Místo před diodou je označeno písmenem A – anoda a za diodou K – katoda. Elektrický signál proudí vždy směrem od anody ke katodě. V případě, kdy by bylo zvyšované napětí od katody k anodě, tak může hrozit průraz diody v závěrném směru, což je nežádoucí stav. Dioda by tedy neměla být přetěžována napětově v závěrném směru a proudově v propustném směru. Úbytek napětí na křemíkové diodě bývá  $U = 0,7 V$ . Dioda jako součást H – můstku zajišťuje ochranu před přepětím a vysokým proudem.

- H – můstek



Obrázek 69 H-můstek [26]

H – můstek je napájen ze zdroje a pracuje na principu spínání kombinací tranzistorů. Spínání tranzistorů závisí na řídicích pulzech od Arduina. H – můstek na svém výstupu generuje řídicí pulzy, které jsou od sebe fázově posunuty.

Každý z motorů má nastavené příslušné mikro krokování (možnosti viz **tabulka 13** - Microsteps) odpovídající plynulému plnění úlohy, kterou má motor ve spektrometru. Plynulý provoz motoru je zajištěn nastavením ovládacích pulzů v řídicím softwaru. Nastavitelné mikro krokování zajišťuje změnu velikosti kroku motoru podle potřeby.



Obrázek 70 Ovládací panel driverů

Výše uvedený ovládací panel slouží pro již zmíněné nastavení hodnoty mikro krokování a hodnoty výstupního proudu pro řízení motorů.

Spínače na **obrázku 69** označeny hodnotami 1, 2, 3 zajišťují změnu mikro krokování a spínače 4, 5, 6 se používají pro nastavení velikosti výstupního proudu. Níže uvedu **tabulku 14** s kombinacemi spínačů (označení: S1, S2, S3, S4, S5, S6) pro nastavení potřebných hodnot a **tabulku 15** s příslušným nastavením spínačů pro každý z používaných motorů.

#### MicrostepDriver

Microstep	Pulse/rev	S1	S2	S3
NC	NC	ON	ON	ON
1	200	ON	ON	OFF
2/A	400	ON	OFF	ON
2/B	400	OFF	ON	ON
4	800	ON	OFF	OFF
8	1600	OFF	ON	OFF
16	3200	OFF	OFF	ON
32	6400	OFF	OFF	OFF

Current(A)	PK Current	S4	S5	S6
0.5	0.7	ON	ON	ON
1.0	1.2	ON	OFF	ON
1.5	1.7	ON	ON	OFF
2.0	2.2	ON	OFF	OFF
2.5	2.7	OFF	ON	ON
2.8	2.9	OFF	OFF	ON
3.0	3.2	OFF	ON	OFF
3.5	4.0	OFF	OFF	OFF

	S1	S2	S3	S4	S5	S6
stepperMriz	OFF	ON	ON	ON	ON	ON
stepperCesta	ON	OFF	OFF	ON	ON	ON
stepperSterbina	ON	OFF	ON	ON	ON	ON
stepperFiltr	ON	OFF	ON	ON	ON	ON
stepperSvetlo	ON	OFF	ON	ON	ON	ON

Tabulka 15 Kombinace spínačů – obecné nastavení

Tabulka 14 Kombinace spínačů pro každý typ motoru

Na driverech se vyskytují konektory pro připojení jednotlivých vinutí motoru a pro řídicí piny Arduina. Vinutí motoru se připojuje pomocí pinů označených jako A+, A-, B+, B-. Písmena označují typ vinutí a označení + a – dva příslušné vodiče vinutí (VCC, GND). Dále se zde vyskytují konektory s označeními: ENA-, ENA+, DIR-, DIR+, PUL-, PUL+.

- ENA (enable)

Tyto konektory se používají k softwarovému odpojení motoru od napájení (disable), když není zrovna používán, a pro jeho opětovné připojení (enable). Signál pro tuto operaci přichází z Arduina do konektoru ENA+. ENA – je využíváno pouze k uzemnění.

- DIR (direction)

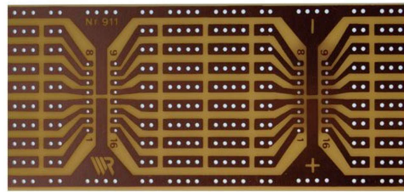
Konektor DIR slouží k řízení směru otáčení motoru. Do konektoru DIR+ přicházejí z Arduina řídicí signály zajišťující potřebný směr otáčení. DIR- opět slouží pouze k uzemnění.

- PUL (pulse)

Posledním řídicím konektorem na driveru je konektor PUL zajišťující uvedení motoru do pohybu. Konektor PUL+ přijímá řídicí signály uvádějící motor do pohybu. Jako v předešlých případech konektor se záporným znaménkem PUL- zajišťuje uzemnění.

### 3.4.4. Prototypové desky

Pro současnou řídicí elektroniku byly použity dvě prototypové desky sloužící v nové řídicí elektronice k přehlednému připojení jednotlivých senzorů spektrometru. Z těchto desek jsou vyvedeny vodiče do Arduina, které signál zpracovává.



Obrázek 71 Použitá prototypová deska [27]

### 3.4.5. Relé

Relé je v současné řídicí elektronice využíváno k ovládní světelného halogenového zdroje. Operuje ve stavu normally open, kdy je jeden z vodičů světelného zdroje připojen přímo k napájení a druhá přes relé. Tím, že je relé ve stavu normally open, tak bez externího signálu z Arduina není světelný zdroj přímo napájen ze zdroje. Stav normally open si lze představit jako neseprnutý koncový senzor.



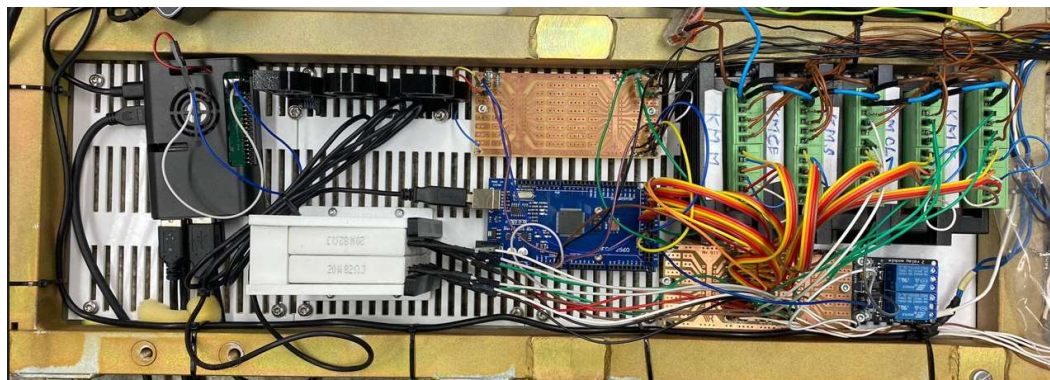
Obrázek 73 2 - kanálový relé modul [35]



Obrázek 72 Stav normally open

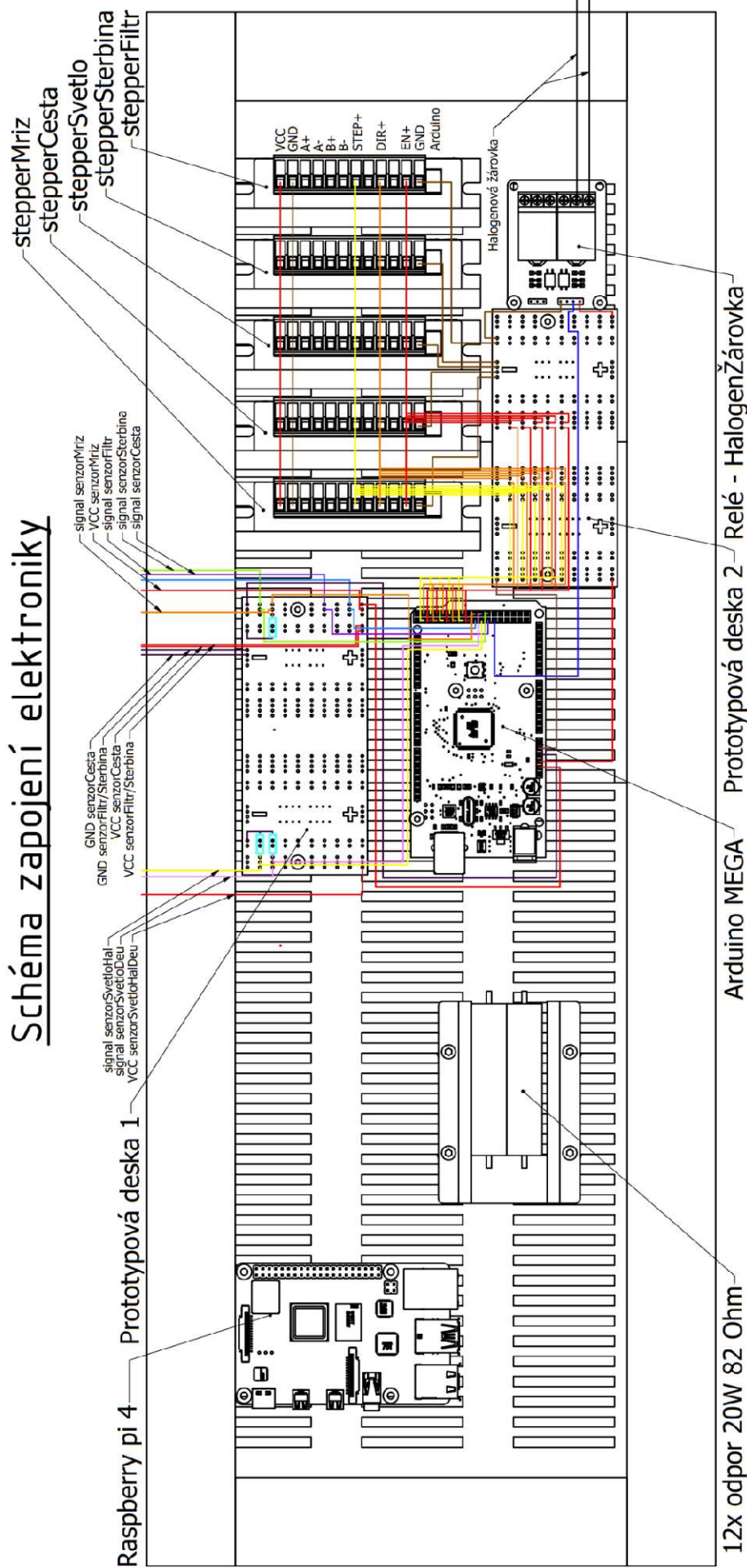
### 3.4.6. Elektronické schéma

Výše popsané komponenty jsou uloženy v původní konstrukci spektrometru a propojeny příslušnými vodiči. Na základě tohoto propojení a uložení elektroniky jsem vytvořil elektronické schéma zapojení všech komponent s popisky. Toto schéma kopíruje reálné uložení elektronických součástí.



Obrázek 74 Fotografie současné řídicí elektroniky

# Schéma zapojení elektroniky





Ve schématu je znázorněno jen připojení elektronických komponent a senzorů k Arduinu (pinout Arduina viz **obrázek 64**). Je to z toho důvodu, aby bylo jasné, jaké piny Arduina jsou využívány, kdyby náhodou došlo k odpojení nebo nějaké poruše v průběhu používání spektrometru. V případě, že by tištěná verze schématu nebyla dostatečně čitelná, tak je součástí přílohy této diplomové práce jeho elektronická verze.

### 3.5. Princip fungování modernizovaného Specordu M42/400

Popis principu fungování modernizovaného spektrometru demonstruji na příkladu měření, které by chtěl uživatel provádět. Detailní popis řídicího softwaru a obsluhy spektrometru je uveden v diplomové práci s názvem: Renovace spektrometru Specord M42/400 – řízení, od autora Bc. Lukáš Bláha.

#### 1. Spuštění spektrometru

Pro spuštění spektrometru je nutné použít spínač na napájecím kabelu, který se nachází u zásuvky. Poté se spustí Raspberry Pi a načte se řídicí systém s počítačovými perifériemi.

#### 2. Spuštění příslušného softwaru (GUI)

Na obrazovce se zvolí spouštěcí program s názvem Spektrometr.sh a otevře se uživatelské rozhraní.



Obrázek 75 Ukázka uživatelského rozhraní – GUI

#### 3. Homing

Hned po spuštění programu se provede Homing, je to proces, při kterém se všechny motory přesunou do počátečních poloh, aby bylo možné provádět příslušná měření. Tento úkon lze provést i opakovaně tlačítkem Homing, v případě chyby při počátečním Homingu.

#### 4. Rozsvícení světelného zdroje

V sekci Nastavení zdroje lze zvolit typ světelného zdroje, který bude uživatel při měření používat. Volba deuteriového světelného zdroje se v uživatelském rozhraní vyskytuje pouze pro případ budoucího vylepšení spektrometru. V současném stavu lze používat pouze halogenový světelný zdroj.

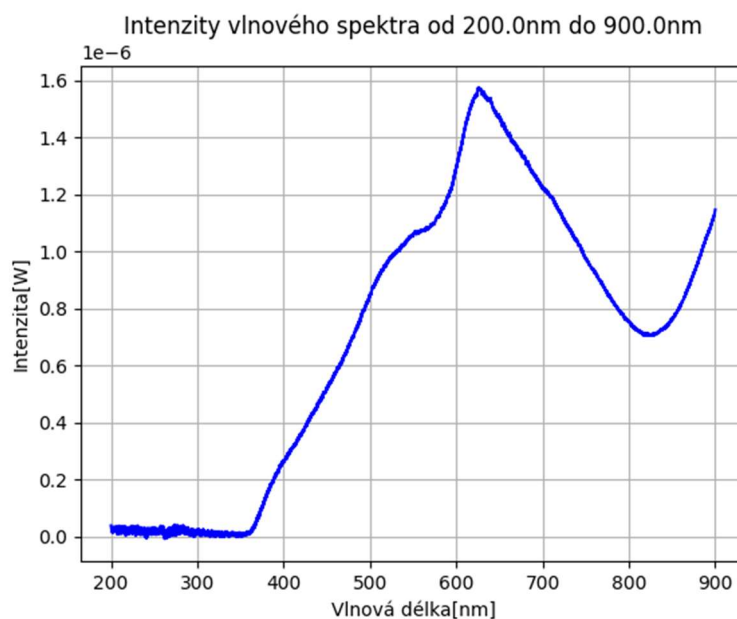
#### 5. Výběr cesty paprsku

Následující sekce s názvem Filtr nabízí uživateli volbu filtrů, které slouží k odstranění určitých vlnových délek záření. Níže uvedu spektrální charakteristiky halogenové žárovky s použitím všech typů filtrů a jejich popis. V oblasti měření nad  $\lambda = 800 \text{ nm}$ , se vyskytuje parazitní zvýšená intenzita záření, která bude více vysvětlena v kapitole **3.6. Provedený experiment (test funkčnosti)**.

#### 6. Volba filtru

- Filtr: 1

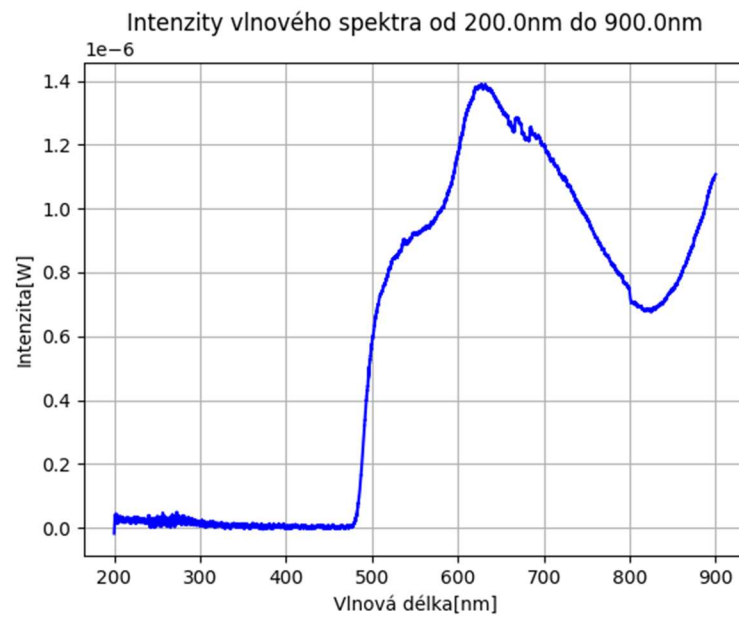
Filtr s číselným označením 1 reprezentuje průchod světla běžným sklem.



Obrázek 76 Spektrální charakteristika Filtr: 1

## ○ Filtr: 2

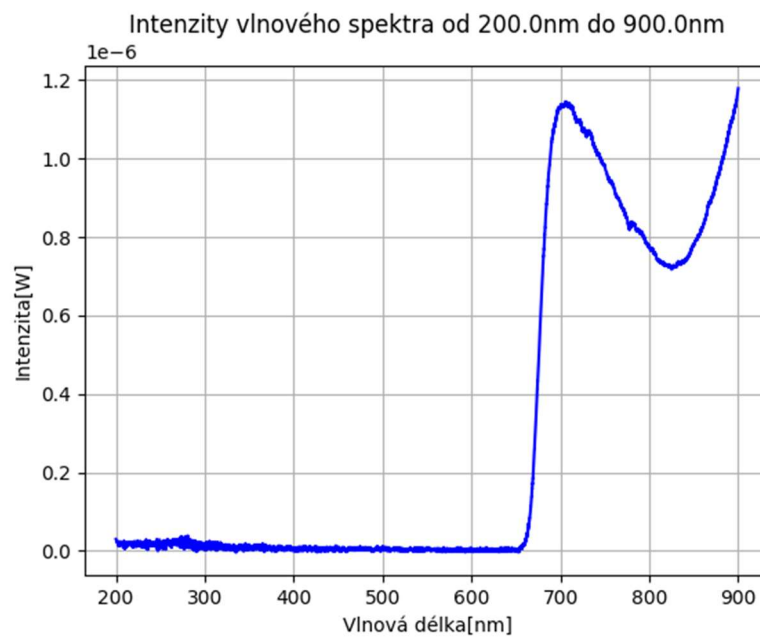
Filtr s číselným označením 2 blokuje krátké vlnové délky záření.



Obrázek 77 Spektrální charakteristika Filtr: 2

## ○ Filtr: 3

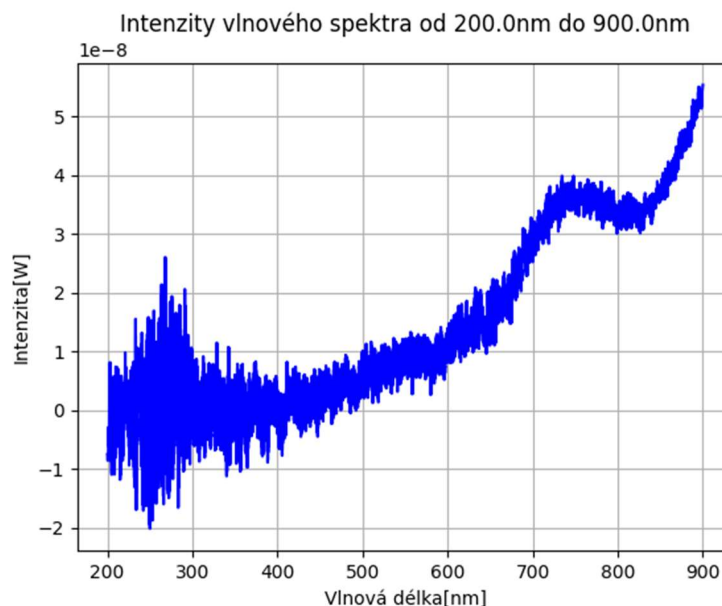
Filtr s číselným označením 3 propouští pouze záření, které má vlnové délky v červené až infračervené oblasti.



Obrázek 78 Spektrální charakteristika Filtr: 3

- Filtr: 4

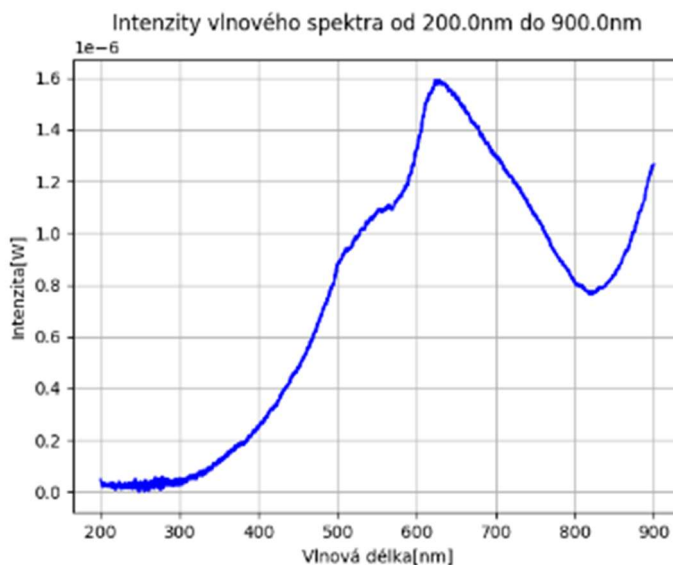
Filtr s číselným označením 4 reprezentuje šedý filtr. Tento typ filtru propouští pouze velmi malou intenzitu záření v celém světelném spektru zdroje. Naměřené hodnoty jsou velmi zašuměné, protože intenzita záření a šum jsou velmi podobné. Softwarový filtr, který vyhlazuje průběh spektrální charakteristiky nedokáže šum a naměřené hodnoty odlišit.



Obrázek 79 Spektrální charakteristika Filtr: 4

- Filtr: 5

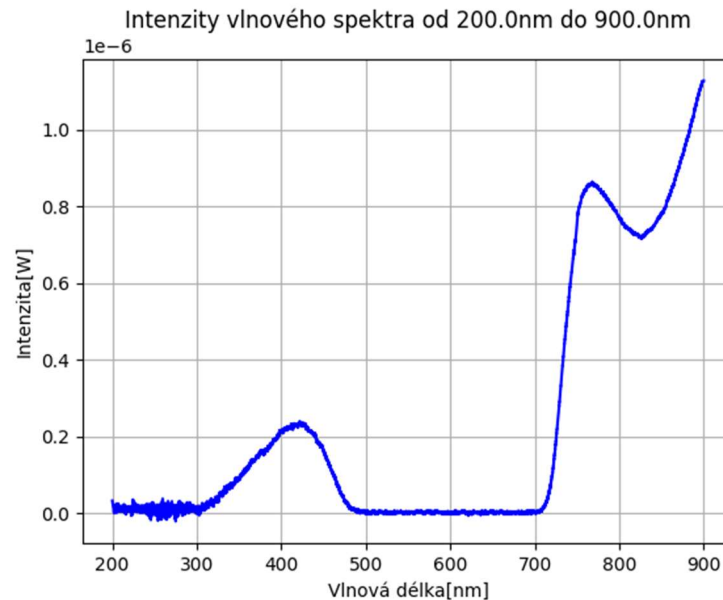
Filtr s číselným označením 5 reprezentuje nastavení bez filtru. Jeho spektrální charakteristika viz další strana.



Obrázek 80 Spektrální charakteristika Filtr: 5

○ Filtr: 6

Poslední filtr s označením 6 blokuje celé viditelné spektrum v rozmezí  $\lambda = (390 \text{ nm} \rightarrow 760 \text{ nm})$ .



Obrázek 81 Spektrální charakteristika Filtr: 6

7. Zvolení intervalu vlnových délek měření [nm]

Předposledním úkonem, který je nutný provést, je zadat interval měřených vlnových délek v sekci Vlnová délka od a Vlnová délka do. Po potvrzení intervalu stisknutím tlačítka ok se spustí měření.

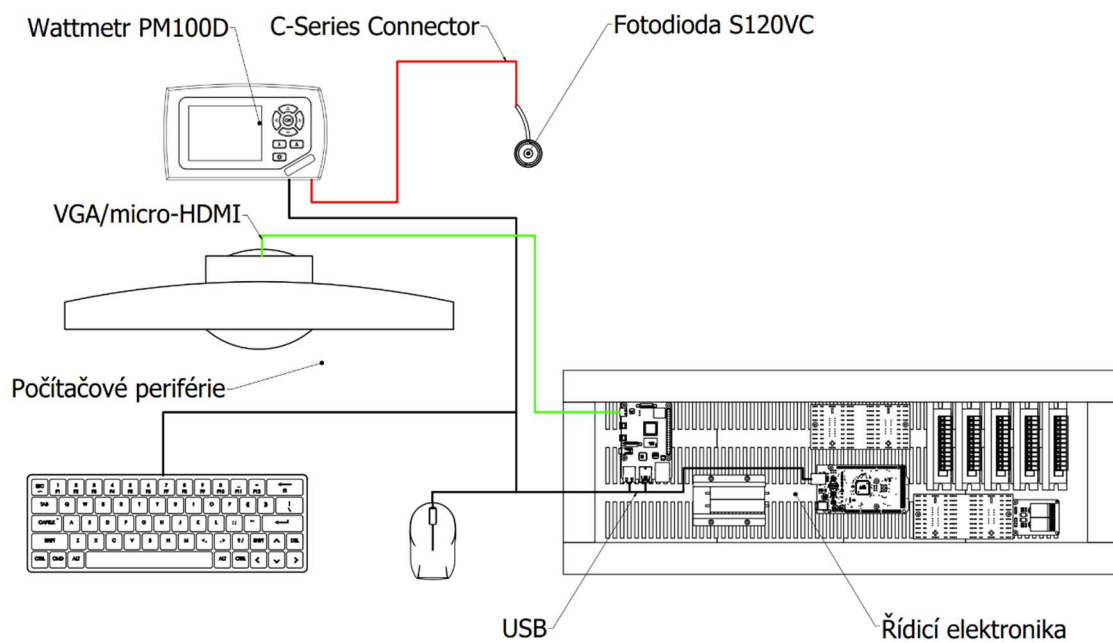
8. Výstupní graf spektrální charakteristiky vzorku

Poté co je měření dokončeno, tak se na obrazovce vykreslí graf spektrální charakteristiky stejným způsobem jako vypadají spektrální charakteristiky v části s popsánymi filtry.

### 3.5.1. Kompletní modernizované pracoviště



Obrázek 82 Kompletní modernizované pracoviště



Obrázek 83 Schéma modernizovaného pracoviště – Specord M42/400

### 3.6. Provedený experiment (test funkčnosti)

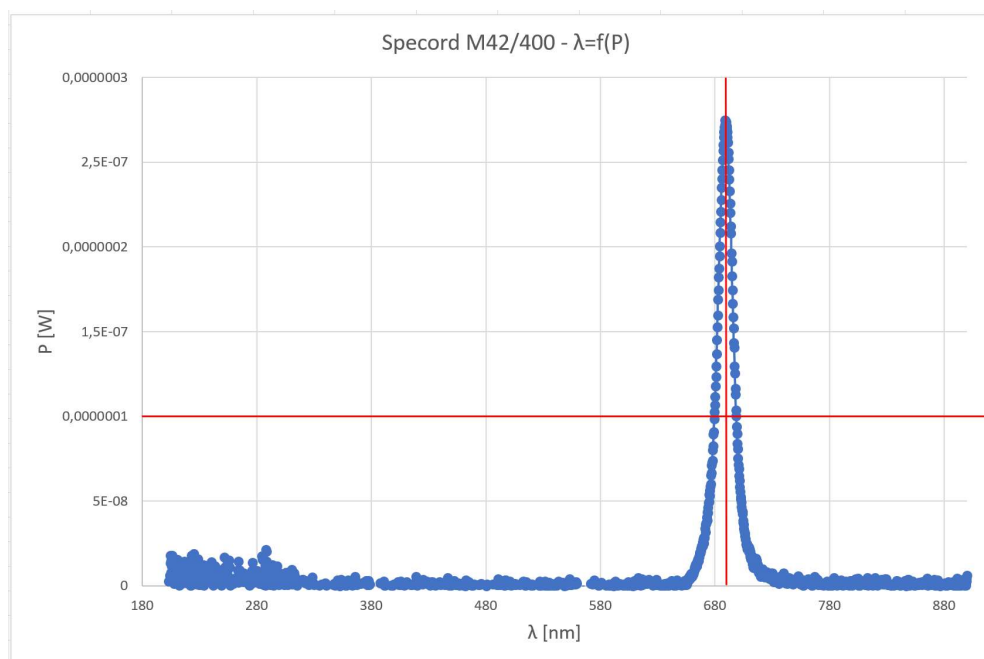
Experiment, který byl proveden pro otestování správné funkčnosti spektrometru se týká měření světelného filtru o známé propustnosti. Filtr propouští záření se specifickou vlnovou délkou. Nejdříve byla propustnost změřena pomocí renovovaného spektrometru a následně spektrometrem vláknovým (typ: Red Tide USB650 Fiber Optic Spectrometer) kvůli porovnání výsledků.

Nastavení příslušných parametrů pro měření viz tabulka níže.

Nastavení experimentu	
Rozsah měření:	200 - 900 nm
Světelný zdroj:	Halogenová žárovka
Otevření štěrbin:	Maximální otevření
Použitý filtr (zabudovaný):	Filtr 5 - žádný filtr
Propustnost měřeného vzorku:	Psaná: 625 nm Reálná: 685 nm

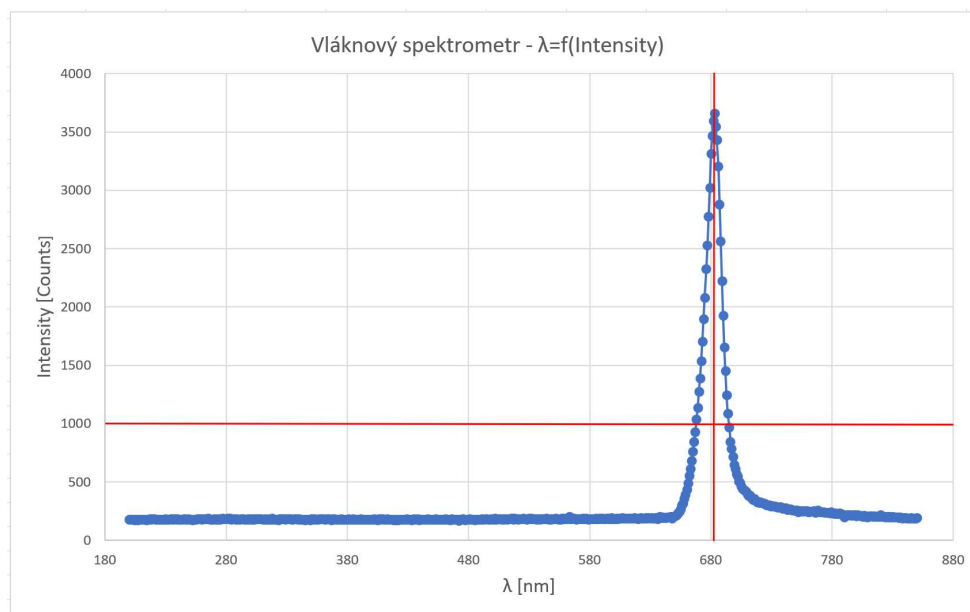
Tabulka 16 Nastavení experimentu

Měření probíhalo tak, že byl vzorek skenován po celém intervalu vlnových délek v rozsahu  $\lambda = 200 \rightarrow 900 \text{ nm}$ . Pro tento interval byla vždy vykreslena spektrální charakteristika halogenového zdroje při prosvícení měřeného vzorku.



Obrázek 84 Spektrální charakteristika – Specord M42/400

Červenou svislou čárou na **Obrázku 84** je označena vlnová délka s hodnotou  $\lambda = 688 \text{ nm}$ . Červenou vodorovnou čárou je znázorněna určitá intenzita záření, díky které bylo možné změřit hledanou vlnovou délku pomocí pološířky křivky.



Obrázek 85 Spektrální charakteristika – vláknový spektrometr (software SpectraSuite)

Na **Obrázku 85** je označena vlnová délka s hodnotou  $\lambda = 683 \text{ nm}$  červenou svislou čárou. Červená vodorovná čára má stejnou vlastnost jako v předešlém grafu. Pro hledání vlnové délky byla použita stejná metodika.

- Shrnutí výsledků:

Výsledky změřené vlnové délky	
Specord M42/400	$\lambda = 688 \text{ nm}$
Vláknový spektrometr	$\lambda = 683 \text{ nm}$

Tabulka 17 Výsledky měření

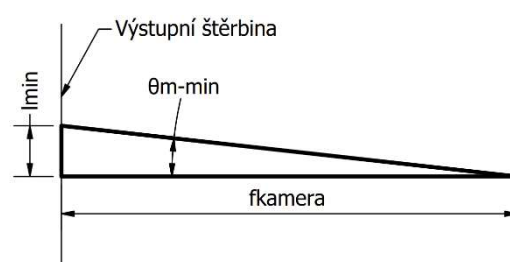
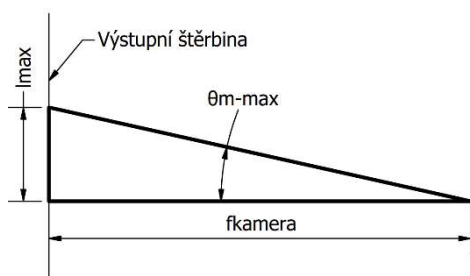
Naměřené hodnoty se od sebe liší o  $\Delta\lambda = 5 \text{ nm}$ . Tento rozdíl je nejspíše způsoben nepřesnou kalibrací renovovaného spektrometru.

V rámci experimentu byla snaha o zpřesnění rozlišení při měření na Specordu M42/400, aby byla měřená vlnová délka více čitelná, ale vzhledem k citlivosti detektoru a množství dopadajícího záření to nebylo možné. Zpřesnění rozlišení se provádí zúžením štěrbin. Nežádoucím jevem je ale snížení množství procházejícího světelného záření, kdy se pro současný detektor stane nedetekovatelné.



Uvedu zde postup, jak lze rozlišení výstupní štěrbinou vypočítat, v případě budoucí výměny detektoru, který by byl schopný detekovat malé množství dopadajícího světelného záření.

Pro výpočet je nutné znát ohniskovou vzdálenost kamery před výstupní štěrbinou spektrometru. Stačí pouze ohnisková vzdálenost kamery, protože se vstupní a výstupní štěrbinou otvírá pomocí stejného motoru. Obraz vstupní a výstupní štěrbinou je stejný. Pomocí ohniskové vzdálenosti kamery a otevření štěrbinou ( $l_{min}$  a  $l_{max}$ ) lze vypočítat geometrický rozsah úhlu ohybu  $\theta_m$ .



Obrázek 86 Schéma pro výpočet maximální hodnoty úhlu ohybu Obrázek 87 Schéma pro výpočet minimální hodnoty úhlu ohybu

- Výpočet mezních hodnot geometrického rozsahu úhlu ohybu

$$\theta_{m-max} = \arctg\left(\frac{l_{max}}{f_{kam}}\right) \quad (14)$$

$$\theta_{m-min} = \arctg\left(\frac{l_{min}}{f_{kam}}\right) \quad (15)$$

- Výpočet mezních hodnot vlnových délek pomocí mřížkové rovnice

$$\left(\frac{\sin(\theta_{m-max}) - \sin(\theta_i)}{j}\right) \cdot d = \lambda_{max} \quad (16)$$

$$\left(\frac{\sin(\theta_{m-min}) - \sin(\theta_i)}{j}\right) \cdot d = \lambda_{min} \quad (17)$$

$f_{kamera}$  [mm] – ohnisková vzdálenost kamery

$l_{max}$  [mm] – maximální otevření výstupní štěrbinou

$l_{min}$  [mm] – minimální otevření výstupní štěrbinou

$\theta_{m-max}$  [°] – maximální úhel ohybu

$\theta_{m-min}$  [°] – minimální úhel ohybu

$\lambda_{max}$  [nm] – maximální vlnová délka

$\lambda_{min}$  [nm] – minimální vlnová délka

$\theta_i$  [°] – úhel dopadu

$j$  [-] – řád spektra

$d$  [μm] – mřížková konstanta (rotzeč štěrbin na mřížce)

Po vypočtení mezních hodnot vlnových délek lze použít následující vztah pro výpočet rozlišení výstupní štěrbin.

$$d\lambda = \lambda_{max} - \lambda_{min} \quad (18)$$

Při zlepšení rozlišení výstupní štěrbin jsou v naměřené spektrální charakteristice čitelnější rozdílné vlnové délky, které se nacházejí velmi blízko u sebe. Hodnoty úhlu dopadu  $\theta_i$  a ohniskové vzdálenosti kamery  $f_{kam}$  jsou uvedeny pouze jako příklad, nejedná se o reálné hodnoty týkající se renovovaného spektrometru.

- Výpočet šířky štěrbin s konkrétními hodnotami

$$\lambda_{min} = 500 \text{ nm} \quad \lambda_{max} = 500,3 \text{ nm} \quad d\lambda = 0,3 \text{ nm}$$

$$d = 1400 \quad j = 1 \quad \theta_i = 20^\circ$$

$$f_{kam} = 250 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} \theta_{m-max} &= \arcsin\left(\frac{j \cdot \lambda_{max}}{d} + \sin(\theta_i)\right) = \arcsin\left(\frac{1 \cdot 500,3}{1400} + \sin(20)\right) \quad (18) \\ &= 44,38^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \theta_{m-min} &= \arcsin\left(\frac{j \cdot \lambda_{min}}{d} + \sin(\theta_i)\right) = \arcsin\left(\frac{1 \cdot 500}{1400} + \sin(20)\right) \quad (19) \\ &= 44,36^\circ \end{aligned}$$

$$l_{max} = \operatorname{tg}(\theta_{m-max}) \cdot f_{kam} = \operatorname{tg}(44,38) \cdot 250 = 244,65 \text{ mm} \quad (20)$$

$$l_{min} = \operatorname{tg}(\theta_{m-min}) \cdot f_{kam} = \operatorname{tg}(44,36) \cdot 250 = 244,47 \text{ mm} \quad (21)$$

$$\text{Otevření štěrbin: } l = l_{max} - l_{min} = 244,65 - 244,47 = 0,18 \text{ mm} \quad (22)$$

### 3.7. Doporučení pro další postup renovace

V této kapitole bych chtěl uvést řadu možností, jak v renovačních pracích na spektrometru pokračovat. Je to z toho důvodu, že finální podoba spektrometru po již provedené renovaci není konečná. Stále lze řadu věcí vylepšit a případně dodělat.

#### 3.7.1. Výměna detektoru

Prvním krokem v pokračování renovačních prací by mohla být výměna nebo úprava detektoru záření.

- Samotná fotodioda

V současné době se jako detektor záření používá fotodioda, která je připojena na wattmetr PM100D. Tento wattmetr nemůže být stále připojený ke spektrometru. Na fakultě s ním bude potřeba provádět další měření, a tak by bylo adekvátní, kdyby byl vymyšlen a realizován způsob, jak vyčítat data z fotodiody přímo do řídicí elektroniky. Fotodioda by tedy zůstala v místech, kde se právě nachází a bylo by k ní potřeba vyrobit příslušný A/D převodník, který by umožnil digitálně zpracovávat naměřená data. Samozřejmě by poté bylo také nutné přizpůsobit řídicí software nahraný v Raspberry Pi.

- Fotonásobič

Druhou alternativou pro výběr detektoru by mohl být nový fotonásobič. Jak je zmíněno výše v diplomové práci, tak fotonásobič byl poptán, ale nebyly dostupné potřebné finance a čas, který by byl potřeba pro jeho dodání. Kdyby se v budoucnu tento problém s časem a penězi vyřešil, tak by se nový fotonásobič nejspíše mohl uložit do krytu původního fotonásobiče a bylo by ho možné přimontovat na místo detektoru.

Výstupem fotonásobiče, ke kterému by byla přidělena patice zpracovávající signál, by byl analogový signál ve specifickém rozmezí. Tento signál by bylo možné zpracovávat řídicí elektronikou a nahraným softwarem.

### **3.7.2. Výroba krytu řídicí elektroniky**

Vzhledem k tomu, že jsou ve spektrometru nutné další renovační práce, tak řídicí elektronika nebyla zakryta. Dalším důvodem je také to, že původní plechové krytí bylo přiděleno ke staré řídicí elektronice, která měla značně větší rozměry než současná.

Bylo by například možné navrhnout a vyrobit kryt z plexiskla, který by byl otvírací a průhledný. Tato realizace by byla vhodná z důvodu snadné přístupnosti elektroniky v případě její poruchy.

### **3.7.3. Zprovoznění deuteriové výbojky**

Kvůli tomu, aby bylo možné na spektrometru v budoucnu měřit i v oblasti ultrafialového záření, tak by bylo dobré, aby byla zprovozněna deuteriová výbojka. Napájecí údaje výbojky jsou uvedeny v podkapitole **3.3.1.9 Deuteriový světelný zdroj**.

K rozsvícení výbojky bude nejspíše nutné dokoupit specifický driver, který zařizuje nažhavení žhavicího vlákna a slouží jako napájecí zdroj. V konstrukci spektrometru se v plastovém pytlíku nachází nepoužité vodiče od elektronických komponentů. Součástí těchto vodičů jsou i vodiče k deuteriové výbojce.

## 4. Závěr

V počátku diplomové práce byla provedena rešerše spektrometrů a principu jejich fungování. Zároveň byla provedena rešerše spektroskopie a spektrometrie a byl vysvětlen jejich rozdíl i spojitosti. Byly demonstrovány rozdíly i podobnosti spektrometrů a monochromátorů bez kterých by bylo obtížné rozlišit a identifikovat renovovaný přístroj. Rešerše spektrometrů se týkala také historie, která principy fungování těchto optických přístrojů ještě více přiblížila.

V praktické části byla provedena fyzická identifikace renovovaného Specordu M42/400. Byly identifikovány všechny součásti spektrometru a zároveň byla otestována jejich funkčnost. V případě nefunkčních součástí byly tyto součásti nahrazeny novými. Identifikace zahrnovala i rozpoznání všech vodičů a jejich přiřazení k elektronickým komponentům v konstrukci spektrometru.

Po počáteční identifikaci byla navržena nová řídicí elektronika, která byla uložena do míst, kde se nacházela elektronika původní. Byla značně zredukována její velikost. Na novou řídicí elektroniku byl připojen nový detektor záření z důvodu nefunkčnosti detektoru původního. Celá nová sestava byla připojena k počítačovým perifériím a otestována.

Test funkčnosti nového spektrometru byl proveden pomocí experimentu, kdy byla změřena spektrální charakteristika halogenové žárovky při průchodu vyzářeného světla specifickým filtrem propouštějícím pouze jednu vlnovou délku světelného záření. Spektrální charakteristika byla změřena externím vláknovým spektrometrem a byla porovnána se spektrální charakteristikou naměřenou na spektrometru renovovaném.

Výsledky experimentu vyšly s mírnou odchylkou, která je okomentována v podkapitole **3.6. Provedený experiment (test funkčnosti)**.

Hodnotím tuto diplomovou práci a renovaci spektrometru za dokončenou. Všechny body zadání byly splněny a spektrometr Specord M42/400 byl úspěšně zprovozněn a otestován.

## **Bibliografie**

- [1] *Slovník cizích slov - spektrometrie* [online]. [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: <https://slovník-cizich-slov.abz.cz/web.php/slovo/spektrometrie>
- [2] *SPECTROMETRY AND SPECTROSCOPY: WHAT'S THE DIFFERENCE?* [online]. 2020 [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: <https://www.atascientific.com.au/spectrometry/>
- [3] GRINGER. *Lineární viditelné spektrum* [online]. 2008 [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=4639774>
- [4] *Optický hranol* [online]. [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Optick%C3%BD\\_hranol](https://cs.wikipedia.org/wiki/Optick%C3%BD_hranol)
- [5] SUIDROOT. *Optický hranol obrázek* [online]. 2008. [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Optick%C3%BD\\_hranol#/media/Soubor:Prism-rainbow.svg](https://cs.wikipedia.org/wiki/Optick%C3%BD_hranol#/media/Soubor:Prism-rainbow.svg)
- [6] *Difrakce bílého světla na optické mřížce* [online]. 2019 [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: <https://fyzikalnipokusy.cz/1833/difrakce-bileho-svetla-na-opticke-mrizce>
- [7] *Visible Ruled Reflective Diffraction Gratings* [online]. ThorLabs [cit. 2023-04-02]. Dostupné z: [https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=8626](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=8626)
- [8] *Diody* [online]. [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: <http://old.spsemoh.cz/vyuka/zel/diody.htm>
- [9] *Blahodárný hormon melatonin závisí i na barvě (chytřejšího) světla* [online]. Smarteon [cit. 2023-04-03]. Dostupné z: <https://smarteon.cz/hormon-melatonin-barva-svetla/>
- [10] BROWN, Charles. *Rozdíl mezi spektroskopií a spektrometrií* [online]. 2021 [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: <https://cs.strephonsays.com/spectroscopy-and-vs-spectrometry-7265>
- [11] *Refraktometrie* [online]. [cit. 2023-02-24]. Dostupné z: <https://www.wikiskripta.eu/w/Refraktometrie>
- [12] *Abbé refractometer* [online]. Refractometer, 2022 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <http://www.refractometer.pl/Abbe-refractometer>
- [13] *History of Spectroscopy* [online]. [cit. 2023-02-24]. Dostupné z: <https://www.zeiss.com/corporate/int/about-zeiss/history/technological-milestones/spectroscopy.html>
- [14] EDENHOFER, Gordian. *Setup of a prism spectrometer* [online]. 2015 [cit. 2023-02-24]. Dostupné z: [https://www.wikiwand.com/en/Prism\\_spectrometer#Media/File:Experiment\\_setup.svg](https://www.wikiwand.com/en/Prism_spectrometer#Media/File:Experiment_setup.svg)
- [15] *Spectrophotometer Specord UV-VIS - specifications*. 1. German Democratic Republic: Carl Zeiss Jena, 1968.

- [16] *Fotometry a spektrofotometry Carl Zeiss Jena* [online]. [cit. 2023-02-24]. Dostupné z: <https://www.labo-ms.cz/pouzite-laboratorni-vybaveni/fotometry-a-spektrofotometry-carl-zeiss-jena/327>
- [17] *SpectraSuite screenshots* [online]. [cit. 2023-02-25]. Dostupné z: <https://macdownload.informer.com/spectrasuite/screenshot/17201/>
- [18] *SPEKTROFOTOMETR DS5* [online]. [cit. 2023-02-25]. Dostupné z: <https://www.optixs.cz/spektrometry-29k/spektrofotometry-107k/spektrofotometr-ds5-191p>
- [19] *Photomultiplier tube R669* [online]. [cit. 2023-02-26]. Dostupné z: [https://www.hamamatsu.com/eu/en/product/optical-sensors/pmt/pmt\\_tube-alone/head-on-type/R669.html](https://www.hamamatsu.com/eu/en/product/optical-sensors/pmt/pmt_tube-alone/head-on-type/R669.html)
- [20] ČÁP, Jiří. *Detektory - prezentace*. ČVUT FS. Dostupné také z: [https://moodle-vyuka.cvut.cz/pluginfile.php/495069/mod\\_resource/content/0/OE-pr-11.pdf](https://moodle-vyuka.cvut.cz/pluginfile.php/495069/mod_resource/content/0/OE-pr-11.pdf)
- [21] NĚMCOVÁ, Šárka. *Ohyb v přístrojích - prezentace*. ČVUT FS. Dostupné také z: [https://moodle-vyuka.cvut.cz/pluginfile.php/88679/mod\\_resource/content/0/ZO-prednaska10.pdf](https://moodle-vyuka.cvut.cz/pluginfile.php/88679/mod_resource/content/0/ZO-prednaska10.pdf)
- [22] *Specord M42/400 - manual (specifications)*. German Democratic republic: Carl Zeiss Jena.
- [23] *The difference between unipolar and bipolar stepper motors* [online]. 2018 [cit. 2023-03-11]. Dostupné z: <https://techexplorations.com/blog/arduino/blog-the-difference-between-unipolar-and-bipolar-stepper-motors/>
- [24] *1x spektrální lampa D2E Narva Deuterium spektrální ultrafialová UV vodíková TRUBICE* [online]. [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: <https://www.ebay.com/itm/353533371416>
- [25] *Arduino Pin Configuration* [online]. 2020 [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: <https://robu.in/arduino-pin-configuration/>
- [26] *Circuit Diagram in H-bridge Configuration* [online]. WatElectronics, 2022 [cit. 2023-04-17]. Dostupné z: <https://www.watelectronics.com/tb6600-stepper-motor-driver-module/>
- [27] *RADEMACHER UP911HP univerzální spoj, 110x50mm* [online]. GM electronic [cit. 2023-04-17]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/v/1508177/rademacher-up911hp-univerzalni-spoj-110x50mm>
- [28] *Mullard Fotonka* [online]. [cit. 2023-02-25]. Dostupné z: <https://www.distrelec.cz/cs/fotonka-mullard-90-cv-fz-9012/p/17405390>
- [29] *Spektrometr a úhloměr* [online]. [cit. 2023-02-26]. Dostupné z: [https://www.conatex.cz/catalog/fyzika/optika/spektroskopie/product-spektrometr\\_a\\_uhlomer/sku-1192004#.Y\\_tfVHbMKUk](https://www.conatex.cz/catalog/fyzika/optika/spektroskopie/product-spektrometr_a_uhlomer/sku-1192004#.Y_tfVHbMKUk)
- [30] *Modul optozávory, pro měření rychlosti* [online]. [cit. 2023-03-11]. Dostupné z: <https://www.postavrobota.cz/Modul-optozavory-pro-mereni-rychlosti-d480.htm#detail-anchor-description>

- [31] *S120VC - Standard Photodiode Power Sensor, UV-Extended Si, 200 - 1100 nm, 50 mW* [online]. [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=S120VC>
- [32] *Raspberry Pi 4 Model B* [online]. Farnell [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: <https://cz.farnell.com/raspberry-pi/rpi4-modbp-8gb/raspberry-pi-4-model-b-cortex/dp/3369503>
- [33] *Motor krokový SPA 52/60-5681 Robotron* [online]. BBelmix [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: <http://bbelmix.is-best.net/detail/show/3200034?i=1>
- [34] *Deska Arduino Mega 2560* [online]. Conrad [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: <https://www.conrad.cz/cs/p/br-deska-arduino-mega-2560-br-a000067-br-br-br-191790.html>
- [35] *2-kanálový relé modul - 5VDC 5A* [online]. Dratek [cit. 2023-04-17]. Dostupné z: <https://dratek.cz/arduino/834-arduino-rele-2-kanaly.html>
- [36] *Sol 2.6* [online]. Bwtek [cit. 2023-04-30]. Dostupné z: <https://bwtek.com/products/sol-2-6/>
- [37] *OCEAN FX VLÁKNOVÝ SPEKTROMETR* [online]. [cit. 2023-02-25]. Dostupné z: <https://www.optixs.cz/spektrometry-29k/vlaknove-spektrometry-55k/ocean-fx-vlaknovy-spektrometr-110p>