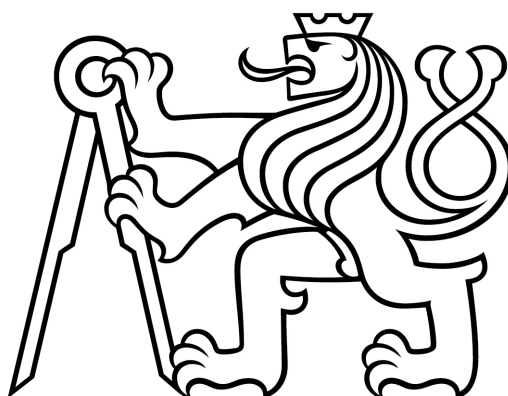


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

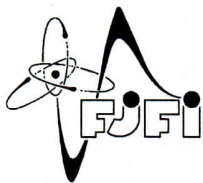
Katedra fyzikální elektroniky



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Optimalizace laserového rezonátoru pomocí
automaticky říditelných zrcadel

Autor: Vilém Boušek
Vedoucí: Ing. David Vyhlídal, Ph.D
Konzultant: Ing. Milan Frank, Ph.D
Akademický rok: 2022/2023



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA JADERNÁ A FYZIKÁLNĚ INŽENÝRSKÁ
Katedra fyzikální elektroniky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: Vilém B o u š e k

Studijní program: Aplikace přírodních věd

Obor: Fyzikální elektronika

Akademický rok: 2022/2023

Název práce: Optimalizace laserového rezonátoru pomocí automaticky
(česky) říditelných zrcadel

Název práce: Laser resonator optimization using motorized mirror mount
(anglicky)

Jazyk práce: Čeština

Cíle práce:

Cílem bakalářské práce bude programové vybavení ve vývojovém prostředí Labview pro ovládání zrcadla laserového rezonátoru, který umožní jeho automatickou optimalizaci na nejvyšší výstupní výkon. V rámci bakalářské práce se student seznámí s principem funkce diodově buzeného pevnolátkového laseru, jeho nastavením a optimalizací a dále se seznámí s programováním v grafickém programovacím prostředí LabView.

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s principem funkce diodově buzeného pevnolátkového laseru a s postupem optimalizace laserového rezonátoru.
2. Seznamte se s vývojovým prostředím LabView od firmy National Instruments.
3. Navrhněte a realizujte programové vybavení v prostředí Labview pro ovládání motorizovaného držáku zrcadla a s jeho pomocí vytvořte algoritmus pro automatickou optimalizaci laseru na nejvyšší výstupní výkon.
4. Porovnejte několik algoritmů z hlediska celkové doby optimalizace.

Doporučená literatura:

1. Koechner Walter. Solid-State Laser Engineering. New York, NY: Springer, 2006. ISBN 978-0-387-29094-2.
2. Firemní dokumentace a webové stránky firmy National Instruments k programu LabView <https://www.ni.com/cs-cz/shop/labview.html>
3. Dong Lizhi, Wenjin Liu, Ping Yang, Bing Xu, Xiang Lei, Yu Ning a Hu Yan. A simple method for automatic cavity alignment of a solid-state laser. Optics Communications. 2011, 284(7), 2003-200. doi: 10.1016/j.optcom.2010.12.047.
4. Brecher C., Schmitt R., Loosen P., Guerrer V., Pyschny N., Pavim A. a Gatej A., Self-optimizing approach for automated laser resonator alignment. Optics and Lasers in Engineering. 2012, 50(2), 287-292. doi: 10.1016/j.optlaseng.2011.08.001.

Jméno a pracoviště vedoucího práce:

Ing. David Vyhřídál, Ph.D.

Katedra fyzikální elektroniky, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT v Praze

Jména a pracoviště konzultanta:

Ing. Milan Frank, Ph.D.

Katedra fyzikální elektroniky, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT v Praze

Datum zadání bakalářské práce: 13. říjen 2022

Termín odevzdání bakalářské práce: 2. srpen 2023

Doba platnosti zadání je dva roky od data zadání.

Ridltz Ivan

garant oboru

Ridltz Ivan

vedoucí katedry

V. N.

děkan

V Praze dne 13. 10. 2022



Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svoji bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

V Praze 5.1.2024


.....
Vítém Boušek

Poděkování

Chtěl bych poděkovat své rodině za podporu při studiu. Dále bych chtěl poděkovat svému školiteli Ing. Davidu Vyhlídalovi, Ph.D. za vedení této bakalářské práce, za ochotu, rady a čas, který mi věnoval. Taktéž děkuji Ing. Milanu Frankovi, Ph.D. za konzultace, poskytnuté rady a čas, který mi věnoval.

Vilém Boušek

Název práce: **Optimalizace laserového rezonátoru pomocí automaticky říditelných zrcadel**

Autor: Vilém Boušek

Obor: Fyzikální elektronika

Druh práce: Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. David Vyhlídal Ph.D, katedra fyzikální elektroniky

Konzultant: Ing. Milan Frank Ph.D, katedra fyzikální elektroniky

Abstrakt: Vytvoření programového vybavení v prostředí LabVIEW pro ovládání krokových motorů a následné využití při optimalizaci laserových rezonátorů nabízí možnosti zefektivnění laboratorní práce a případně i zvýšení přesnosti měření. V teoretické části bylo úkolem seznámit se s principem fungování diodově buzeného pevnolátkového laseru a s vývojovým prostředím LabVIEW. V experimentální části jsem následně sestavil několik diodově buzených pevnolátkových laserů využívajících krystalu $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$, jako aktivního prostředí. Dále jsem zkoumal chování krokových motorů a jejich vliv na kinematický držák zrcadla. Ve vývojovém prostředí LabVIEW jsem vytvořil algoritmus a příslušné grafické rozhraní pro optimalizaci laseru na nejvyšší výstupní výkon.

Klíčová slova: LabVIEW, krokové motory, optimalizace, laser

Title: **Laser resonator optimization using motorized mirror mount**

Author: Vilém Boušek

Abstract: The development of software in LabVIEW environment for controlling stepper motors and subsequent use in optimization of laser resonators offers possibilities to improve the efficiency of laboratory work and possibly enhance measurement accuracy. In the theoretical part, my task was to familiarize myself with the operational principles of diode-pumped solid-state lasers and the LabVIEW development environment. In the experimental part, I constructed multiple diode-pumped solid-state lasers utilizing $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ crystal as the active medium. Moreover, I investigated the behavior of stepper motors and analyzed their effect on the kinematic mirror holder. Utilizing the LabVIEW development environment, I devised an algorithm and corresponding graphical interface aimed at optimizing the laser for the highest output power.

Key words: LabVIEW, stepper motor, optimalization, laser

Obsah

1	Seznámení s lasery	11
1.1	Stimulovaná emise	11
1.2	Tří a čtyř hladinové systémy	12
1.3	Aktivní prostředí	13
1.3.1	Nd ³⁺ :YVO ₄	13
1.4	Laserová dioda	13
1.5	Otevřené rezonátory	14
1.6	Režimy generace laserového záření	14
1.6.1	Mode-locking	14
2	Použité přístroje	16
2.1	Spektrofotometr	16
2.2	Laserové diody	16
2.3	Wattmetr	18
2.4	Fotodetektory	18
2.5	Osciloskopy	18
2.6	A/D převodníky	19
2.7	Multimetr	19
2.8	Měření profilu svazku	19
3	LabVIEW a krokové motory	20
3.1	Vývojové prostředí LabVIEW	20
3.2	Kinematický držák zrcadla	24
3.2.1	Měření stability krokového motoru	25
3.2.2	Vliv teploty krokového motoru	27
4	Vyvinuté laserové systémy a jejich optimalizace	31
4.1	Součásti laserových systémů	31
4.2	Optimalizace laserových systémů bez automatického nastavení	32
4.2.1	Rezonátor typu V	33

4.2.2	Rezonátor typu Z	35
4.2.3	Mode locking	36
4.3	Použití kinematického držáku zrcadla pro optimalizaci laserových systémů	39
4.3.1	Optimalizace laserových rezonátorů pomocí automaticky říditelných zrcadel	39
4.3.2	Algoritmy pro skenování oblasti	41
4.4	Řešené výzvy	43
4.4.1	Generace pulsů	44
4.4.2	Obrácení pořadí	44
4.5	Ovládání grafického rozhraní	47
	Závěr	49
	Literatura	50
	Přílohy	52

Úvod

Otevřené rezonátory představují důležitou součást laserových oscilátorů, ke správnému fungování je důležité jejich nastavení. Zrcadla laserového rezonátoru je nutné naladit tak, aby došlo ke vzniku kladné zpětné vazby. Která je nápomocna k dosažení laserové činnosti. Následně je vhodné provést proces optimalizace nastavení zrcadel otevřeného rezonátoru pomocí jemného pohybu jednotlivých optických prvků, k tomu se využívají šrouby s velmi jemným stoupáním.

Pro prvotní nastavení polohy zrcadel a následný proces optimalizace, se tradičně využívá manuální metoda. Tento přístup je časově náročný, zejména pokud se jedná o systém s více stupni volnosti nebo o dlouhé laserové rezonátory. Dalším problémem je přesnost nastavení při takovém přístupu a jeho opakovatelnost.

Otevírá se tedy možnost k uvedení automatizace pro řešení těchto komplikací. Byla již demonstrována možnost využití robotického ramene schopného pohybu ve třech prostorových osách s celkem šesti stupni volnosti k optimalizaci laserových rezonátorů [1]. Dalším přístupem je využití motorizovaných držáků zrcadel k optimalizaci systému. Tyto držáky mohou využívat buď krokové nebo piezoelektrické motory. Výhodou piezoelektrických motorů je vyšší dosažitelná přesnost avšak cenou je nižší rychlost a vyšší cena v porovnání s krokovými motory.

Bylo by tedy výhodné mít k dispozici nástroj, který by byl schopen na základě počítačového algoritmu pro pohyb kinematického držáku schopen nalézt optimální polohu zrcadel tak, aby laserový systém generoval co nejvyšší výstupní výkon a zefektivnil tak práci v laboratoři, neboť čas klasicky strávený manuálním nastavováním systému by bylo možné využít pro další vědeckou činnost.

Dalším možným využitím automatizace je ladění laseru v reálném čase, neboť vlivem externích jevů jako jsou: teplota, vlhkost, či otřesy, dochází k částečnému rozladění laserového systému, které je nutné kompenzovat, aby byly zachovány žádané parametry laserového svazku.

Tématem optimalizace laserového rezonátoru se zabývám ve své bakalářské práci, jejíž cílem je vytvořit programové vybavení v prostředí LabVIEW pro ovládání motorizovaného držáku zrcadla, vybaveného krokovými motory. Toto programové vybavení by umožnilo automatizaci optimalizace polohy jednoho zrcadla laserového rezonátoru o dvou zrcadlech.

Komplexnějšími systémy s větším počtem optických komponent se bude zabývat navazující výzkumný úkol a diplomová práce.

Kapitola 1

Seznámení s lasery

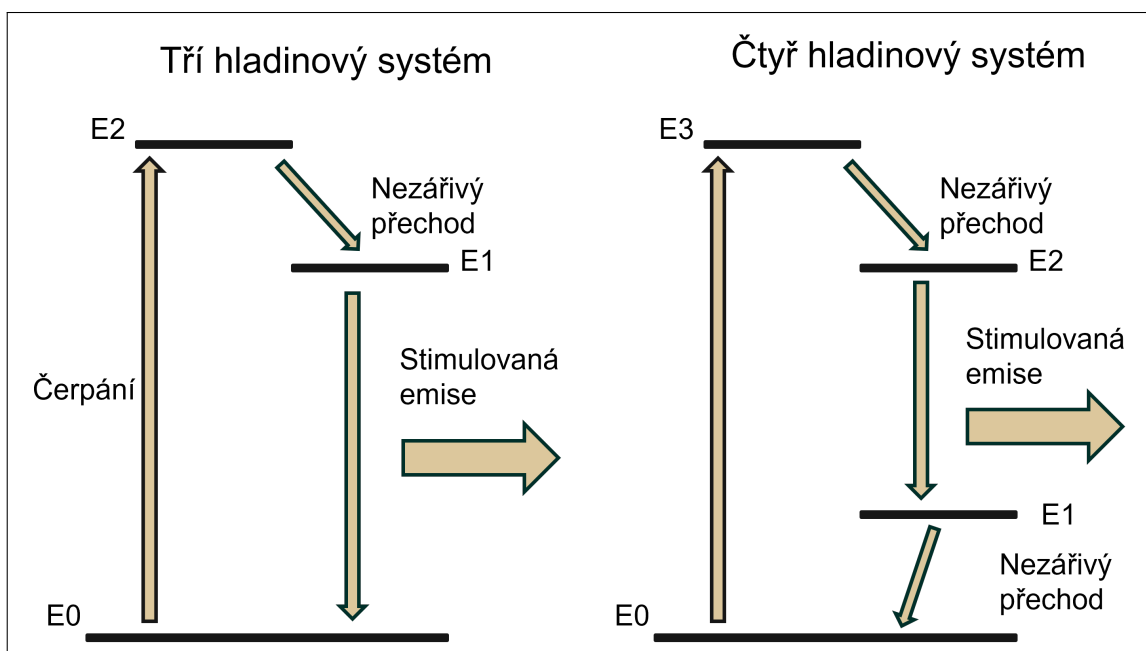
Laser neboli zkratka pro "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation", v překladu zesilování světla stimulovanou emisí záření, je způsob generace koherentního, téměř monochromatického vysoce směrového záření s vysokou intenzitou. Fyzikální princip fungování laseru popsal již roku 1917 Albert Einstein [2], avšak jeho objev nebyl zcela doceněn. K sestrojení prvního funkčního laseru došlo až roku 1960 Theodorem H. Maimanem [3]. Jednalo se o pevnolátkový laser, jehož aktivní prostředí tvořil krystal rubínu. Po tomto průlomem došlo k výzkumu a vývoji laserů se širokou paletou aktivních prostředí, od krystalů, kapalin přes plynné směsi až po polovodiče, které v dnešní době nalézají široké spektrum aplikací nejen ve vědecké sféře a průmyslu, ale i v běžném životě.

Laserový systém se skládá ze třech základních částí: aktivní prostředí, čerpání a rezonátor. V následujícím popisu se zaměříme na pevnolátkové lasery čerpané polovodičovou laserovou diodou.

Princip fungování pevnolátkového laseru čerpaného laserovou diodou je následující: z polovodičové laserové diody vychází čerpací svazek s vlnovou délkou odpovídající absorpčnímu maximu aktivního prostředí, který prochází vstupním zrcadlem, které je vysoce propustné pro tuto vlnovou délku, fokusuje se a následně pokračuje do již zmíněného aktivního prostředí. V aktivním prostředí dochází k absorpci budícího záření a ke vzniku stimulované emise. Záření vzniklé pomocí stimulované emise pokračuje dále do rezonátoru, ve kterém dochází k akumulaci energie a záření z něj vystupuje pomocí výstupního zrcadla.

1.1 Stimulovaná emise

Z fyzikálního pohledu laser ke svému fungování využívá jevu stimulované emise, která spočívá v interakci atomu ve vyšším energetickém stavu a vnějšího elektromagnetického pole ve formě fotonu, jehož energie odpovídá rozdílu mezi stavem excitovaným a některým z níže položeným. Po interakci dojde k přechodu kvantové částice na některou z nižších energetických hladin a při tom dojde k vyzáření fotonu se stejnými charakteristikami: energie, fáze, směr, jako foton, který interagoval s atomem.



Obrázek 1.1: Schéma tří a čtyř hladinového systému. Převzato z [4].

1.2 Tři a čtyř hladinové systémy

U laserů se setkáváme se dvěma základními systémy: tří hladinovým a čtyř hladinovým. Princip tří hladinového systému je následující, máme tři energetické hladiny, kvantové částice v základní hladině - E0 jsou excitovány dopadajícími fotony a přecházejí do hladiny E2, ze které dochází k rychlému nezářivému přechodu do hladiny E1, energie se při nezářivém přechodu ukládá do kmitů krystalové mřížky a následně z hladiny E1 přechází excitovaná částice pomocí zářivého přechodu opět do základní hladiny, viz Obr. 1.1. Negativem tohoto systému je nízká účinnost, neboť aby došlo k inverzi populace hladin musí dojít k vybuzení alespoň poloviny atomů ze základní hladiny. Příkladem materiálu s takovým systémem energetických hladin je například rubín.

Druhým základním uspořádáním je čtyř hladinový systém. V tomto případě jsou kvantové částice ze základní hladiny E0 excitovány a přecházejí do hladiny E3, ze které pomocí rychlého nezářivého přechodu přejdou do hladiny E2 a následně zářivým přechodem do hladiny E1 a následně opět nezářivým přechodem do základního stavu E0, viz Obr. 1.1. Oproti předchozímu případu bývá většinou dosahováno vyšší účinnosti, výjimkou je ku příkladu Ytterbium (Yb^{3+}), které je kvazi 3 hladinové, neboť odpadá nutnost vybuzení alespoň poloviny atomů ze základní hladiny. Typickými představiteli jsou materiály s implantovanými ionty neodymu Nd^{3+} , například YAG ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) a YVO_4 pro vlnovou délku 1064 nm [5], [6], sklo a další.

1.3 Aktivní prostředí

Aktivní prostředí je místo, kde dochází ke vzniku stimulované emise v laseru, jejíž princip byl popsán výše. Aktivní prostředí mohou být různých typů, podle kterých můžeme lasery klasifikovat. Může se jednat o pevné látky, plynné směsi nebo třeba kapaliny. Ve své bakalářské práci jsem se věnoval diodově čerpaným pevnolátkovým laserům, které jako své aktivní prostředí využívaly krystalu $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$.

1.3.1 $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$

Výhodou tohoto materiálu je skutečnost, že $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ má vysoký emisní účinný průřez a vysoký absorpční průřez v porovnání s $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ [4]. Základní fyzikální charakteristiky tohoto krystalu jsou uvedené v Tab. 1.1 a na Obr. 4.1 je zobrazen krystal, který jsem používal ke své práci.

Tabulka 1.1: Vlastnosti aktivního prostředí $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$. Převzato z [4, 6].

Materiál	$\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$
Krystalová mřížka	tetragonální
Hustota [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$]	4.22
Index lomu	$n_e = 2.17$ ($\parallel c$), $n_o = 1.96$
Šířka emisního spektra [nm]	1
Teplená vodivost [$\text{W} \cdot (\text{mK})^{-1}$]	5
Maximum absorpce [nm]	808.5 ($\parallel c$)
Maximum emise [nm]	1064.3 ($\parallel c$)
Doba fluorescence [μs]	90
Emisní účinný průřez na $\lambda = 1064$ nm [cm^{-2}]	$114 \cdot 10^{-20}$ ($\parallel c$)
Absorpční účinný průřez na $\lambda = 808$ nm [cm^{-2}]	$60 \cdot 10^{-20}$ ($\parallel c$)
Standartní dopace Nd [at.%]	1

1.4 Laserová dioda

Laserová dioda se skládá z více vrstev: vrstva s nadbytkem elektronů (n zóna), vrstva s nadbytkem elektronových děr (p zóna) a intrinzická vrstva, která má vyrovnaný počet elektronů a děr. Existují dva základní typy těchto diod dle směrů vyzařování, jedná se buď o vyzařování v rovině vrstev nebo v rovině kolmé na uvedené vrstvy (takové diody se nazývají VCSEL - Vertical Cavity Surface Emitting laser).

Aby docházelo ke stimulované emisi v tomto prostředí potřebujeme do tohoto systému zavést odrazné plochy, které následně vytvoří rezonátor. Odrazné plochy vzniknou buď napařením odrazných vrstev na hrany polovodiče nebo štěpem polovodičového materiálu ve vhodné rovině, kde díky značnému rozdílu indexů lomu mezi použitým polovodičovým materiálem a vzduchem, v takto připraveném systému dochází k oscilaci fotonů, které následně způsobí jev stimulované emise a generace laserového záření. Polovodičové laserové diody jsou jedním ze způsobů čerpání

aktivního prostředí v diodově buzených pevnolátkových laserech, dalšími způsoby je například čerpání dalším laserem.

1.5 Otevřené rezonátory

Předchůdcem laseru byl maser (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation), který využíval stimulovanou emisi molekul v mikrovlnné oblasti [7]. Maser využíval takzvané uzavřené rezonátory, tyto rezonátory svým rozměrem odpovídají vlnové délce, případně jejímu násobku. Zatímco uzavřené rezonátory pro masery byly technologicky vyrobitelné, pro aplikaci v laserech tomu již tak nebylo, nemluvě o výstupním výkonu, který by byl detekovatelný se značnými problémy, ne-li vůbec [8].

Proto se začalo v laserové technice s využíváním rezonátorů, které odpovídají rozložením zrcadel Fabry-Perotově interferometru [9], na rozdíl od něj ale jedno zrcadlo je vysoce odrazné a druhé polopropustné. Hlavním rozdíly byly následující: absence bočních stěn a podmínka pro velikost čelních stěn, které musejí být mnohem větší, než je vlnová délka generovaného záření. Tento typ rezonátorů se nazývá otevřený rezonátor.

1.6 Režimy generace laserového záření

Základním režimem je volná generace (free-running), při kterém je aktivní prostředí stále čerpáno a ztráty v rezonátoru zůstávají po celou dobu generace záření neměnné. Po ustálení teplotních a dalších jevů je generováno záření o konstantním výkonu.

Pokud bychom chtěli generovat impulsy délky řádově nanosekund, využijeme metody Q-spínání (Q-switching). Při této metodě úmyslně vytvoříme v rezonátoru dodatečné ztráty (snížení činitele jakosti rezonátoru), dochází tak k akumulaci energie v aktivním prostředí v podobě inverze populace hladin. Následným snížením ztrát dochází k rychlému přechodu kvantových částic na nižší energetické hladiny za současné emise fotonů. Výsledkem je impuls s délkou řádově jednotky až desítky nanosekund a vysokým špičkovým výkonem. Generovaný impuls je řádově kratší, než doba po kterou byl činitel jakosti rezonátoru snížen [4].

Ke generaci impulsů s délkou řádově pikosekund se používá metody synchronizace módů, známější pod anglickým názvem Mode-locking. V rámci bakalářské práce jsem se zabýval touto metodou blíže zabýval.

1.6.1 Mode-locking

Pro různorodé aplikace například v medicínských oborech nebo při generaci vyšších harmonických frekvencí jsou potřebné impulsy jejichž délka je v řádech pikosekund až femtosekund a zároveň poskytují vysoké hodnoty výstupního špičkového výkonu. Metoda, pomocí které lze těchto parametrů docílit nese anglický název

mode-locking (synchronizace módů). Principem této metody je fázové svázání podélných módů v laseru, šířka generovaného impulsu je nepřímo úměrná šířce spektra laserového záření [4]. Podle způsobu dosažení se mode-locking dělí na aktivní a pasivní. Aktivního mode-lockingu se dá například dosáhnout pomocí akusto-optického modulátoru nebo Mach-Zehnderova modulátoru. Pro pasivní metodu generace se nejčastěji používají polovodičové saturevatelné absorbéry na zrcadle (Semiconductor Saturable Absorber Mirrors, SESAM), dříve byly používány i roztoky organických barviv. Mode-locking pomocí SESAM využívá nelineární změny reflektivity, která způsobuje snížení jakosti rezonátoru.

Kapitola 2

Použité přístroje

V průběhu měření v rámci své bakalářské práce jsem používal různé měřicí přístroje, vždy v závislosti na konkrétní aplikaci.

2.1 Spektrofotometr

K určení spektrální charakteristiky krystalu $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ jsem využil spektrofotometru Shimadzu UV-3600, který využívá několika různých zdrojů pro generaci záření v rozsahu od ultrafialové po infračervenou oblast. Základní parametry tohoto spektrofotometru jsou uvedeny v Tab. 2.1

Tabulka 2.1: Základní vlastnosti spektrofotometru Shimadzu UV-3600. Převzato z [10].

Rozsah	185 - 3300 nm
Rozlišení	0.1 - 8 nm
Přesnost	± 0.2 nm (UV/viditelná oblast), ± 0.8 nm (blízká IČ oblast)
Rychlost měření	4000 nm/min (PbS) – 9000 nm/min (InGaAs)
Fotometr. systém	dvoupaprskový
Fotometrický rozsah	-6 až 6 absorbančních jednotek
Zdroj světla	50 W halogenová lampa, deuteriová lampa
Monochromátor	dvojitý monochromátor se dvěma difrakčními mřížkami
Detektor	UV/viditelná oblast – fotonásobič (R928), blízká IČ oblast – InGaAs fotodioda/chlazený PbS fotodetektor

Pro měření spektrálních charakteristik svazku z budící laserové diody byl využit spektrometr Ocean Optics HR2000, který využívá lineárního křemíkového CCD čipu, který umožňuje měřit vlnové délky v rozsahu 200-1100 nm [11].

2.2 Laserové diody

Jako budící laserovou diodu jsem používal diodu s označením ATC 2049, která generovala záření na vlnové délce 808 nm při teplotě $T = 23$ °C. Výstupní výkon této

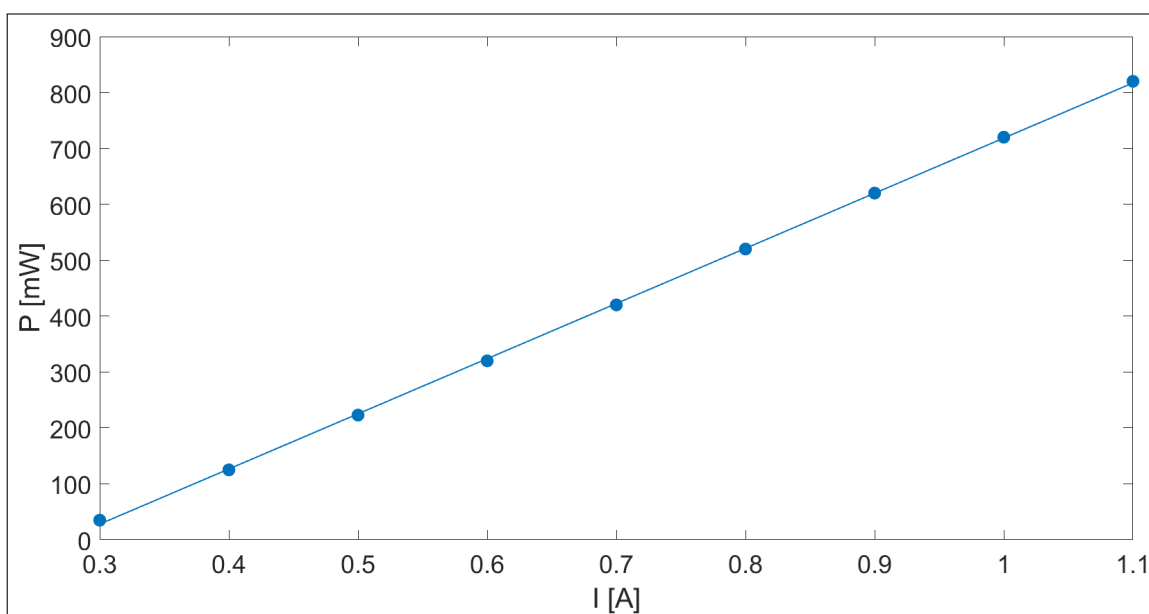
diody pro maximální proud 1.1 A uvádím v Tab. 2.2. Závislost výkonu polovodičové diody na hodnotě elektrického proudu je uvedena na Obr. 2.1.

Tabulka 2.2: Shrnutí hodnot výstupního výkonu pro používanou laserovou diodu.

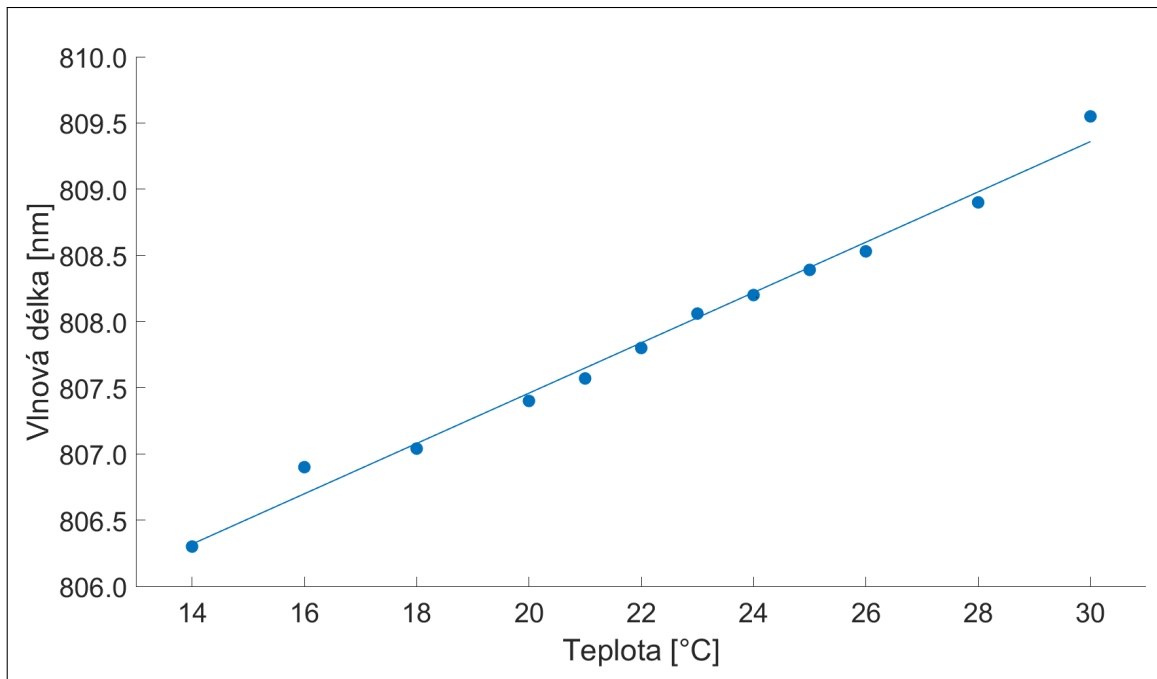
	Název	Výstupní výkon [mW]
Budící laserová dioda	ATC 2049	830

K dodatečnému doladění vlnové délky laserové diody můžeme využít změny teploty. Jak jde vidět z Obr. 2.2, na kterém je zachycen vývoj střední hodnoty vlnové délky, se zvyšující teplotou dochází k jejímu prodlužování, ze získaných hodnot vyplývá, že změna odpovídá hodnotě

$$\frac{d\lambda}{dT} = 0.19 \text{ nm}/^{\circ}\text{C} \quad (2.1)$$



Obrázek 2.1: Závislost výkonu polovodičové laserové diody na hodnotě elektrického proudu.



Obrázek 2.2: Změna střední hodnoty vlnové délky laserové diody ATC 2049 v závislosti na teplotě.

2.3 Wattmetr

Pro měření výstupního výkonu z laserů jsem používal senzor pro měření kontinuálního výkonu Coherent PM10, výkonový rozsah 10 mW až 10 W, spektrální rozsah 0.25 - 11 μm , průměr aktivní plochy 19 mm, rozlišení 0.2 mW [12], který byl připojen k měřiči výkonu Coherent FieldMaxII-TO Laser Power Meter 1098579.

2.4 Fotodetektory

Pro měření časového průběhu laseru byla použita fotodioda ET-3500 od společnosti Electro-Optics Technology Inc. V této fotodiodě je čip z materiálu InGaAs s šířkou pásma 15 GHz, délkou náběžné/sestupné hrany 25 ps a je určena pro měření vlnových délek v rozsahu 1000 až 1650 nm [13].

Dále jsem využíval velkoplošnou fotodiodu Thorlabs FDS1010. Rozsah vlnových délek 350 - 1100 nm, aktivní oblast 10x10 mm, náběžná/sestupná doba 65 ns [14].

2.5 Osciloskopy

Pro měření délky impulsů a jejich časové stability jsem využíval osciloskopů. Charakteristické vlastnosti každého osciloskopu jsou vzorkovací frekvence a analogová šířka pásma. Nejprve jsem využíval osciloskop Tektronix DPO 4104B-L, jehož vzorkovací frekvence byla 5 GS/s a analogová šířka pásma 1 GHz, tyto hodnoty jsou postačující pro měření pulsů delších než 1 ns.

Pro měření ultrakrátkých impulsů v režimu synchronizace módů byl využíván osciloskop Teledyne LeCroy SDA813Zi se vzorkovací frekvencí 80 GS/s a analogovou šířkou pásma 13 GHz.

2.6 A/D převodníky

A/D převodník neboli Analogově-digitální převodník je zařízení pro převod analogového signálu, což je spojitá veličina například napětí na signál digitální, který je reprezentován pomocí binárních čísel a umožňuje tak jeho následné zpracování počítačem. Důležitým parametrem A/D převodníku je počet bitů (běžně dostupné jsou 8-32bitové převodníky). Bity odpovídají tomu, na kolik diskretních hladin bude analogový signál rozdělen. Druhým důležitým parametrem je vzorkovací frekvence. Vzorkovací frekvence musí být zvolena tak aby byl splněn Nyquistův–Shannonův vzorkovací teorém:

"Přesná rekonstrukce spojitého, frekvenčně omezeného signálu z jeho vzorků je možná tehdy, pokud byla vzorkovací frekvence vyšší než dvojnásobek nejvyšší harmonické složky vzorkovaného signálu." [15]

Konkrétně se nejprve používal 16bitový A/D převodník NI USB-6212 s vzorkovací frekvencí až $4 \cdot 10^5$ vzorků/s, u tohoto A/D převodníku nastal problém se synchronizací vzorkování s jednotlivými kroky motoru. Druhý používaný A/D převodník využíval 12bitový převodník uvnitř 32bitového mikrokontroléru dsPIC32MK od firmy Microchip, maximální vzorkovací frekvence tohoto převodníku je $3.75 \cdot 10^6$ vzorků/s.

2.7 Multimetr

Při testování závislosti stability svazku na teplotě krokového motoru jsem teplotu měřil pomocí odporového teplotního senzoru SA10200542 typu Pt1000 od firmy CYNTEC. Pro vyčítání hodnot jsem používal multimetr Aim TTi 1908P Dual Measurement Multimeter.

2.8 Měření profilu svazku

K měření profilu svazku a při zkoumání vlivu teploty na jeho prostorovou stabilitu jsem použil kameru WinCamD-UCD23 - 2/3", z které byla měřená data zpracovávána pomocí programu v LabVIEW. Tato kamera využívá CCD čip, díky kterému dokáže měřit vlnové délky v rozsahu 355-1150 nm, rozlišení čipu je 1360 x 1024 pixelů, aktivní plocha má rozměr 8.8 x 6.6 mm a rozměr jednoho pixelu je 6.45x6.45 μm [16].

Kapitola 3

LabVIEW a krokové motory

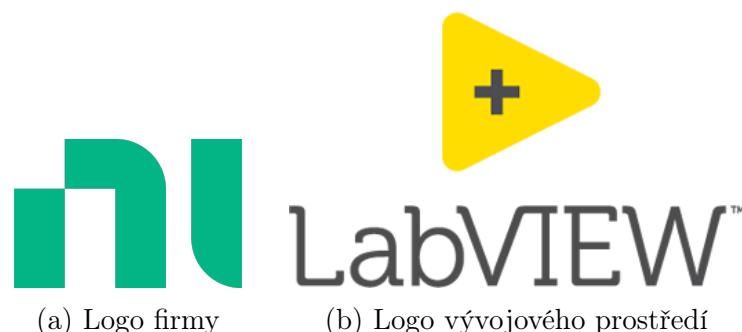
3.1 Vývojové prostředí LabVIEW

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) je grafické vývojové prostředí od společnosti National Instruments. Samotná společnost National Instruments (NI) byla založena roku 1976, počátek LabVIEW se datuje do roku 1983, na trh bylo uvedeno o tři roky později a od té doby dochází k neustálému vylepšování a rozšiřování poskytovaných funkcí.

Program v prostředí LabVIEW se nazývá VI (zkratka pro Virtuální instrument). Když vytvoříme nový program - VI, dojde k otevření dvou oken: Front panelu a Blokového diagramu. Front panel neboli uživatelské rozhraní představuje místo, ve kterém zadáváme vstupní parametry pro naši aplikaci a kde zobrazujeme výstupní data, ať již v podobě reprezentace číselné, nebo vizuální (graf, ručičkový ukazatel, kontrolka atd.). Mnohdy pak Front panel připomíná čelní panel reálného přístroje.

V blokovém diagramu programujeme algoritmus vlastního programu, ať jde o propojení jednotlivých VI programů, vestavěných funkcí, výpočetních, či logických operací. Příklady těchto pokročilých funkcí jsou interpolace, extrapolace, lineární a nelineární regrese, pravděpodobnostní a statistické funkce, funkce pro práci s polynomy, řešení obyčejných, či parciálních diferenciálních rovnic a mnoho dalších.

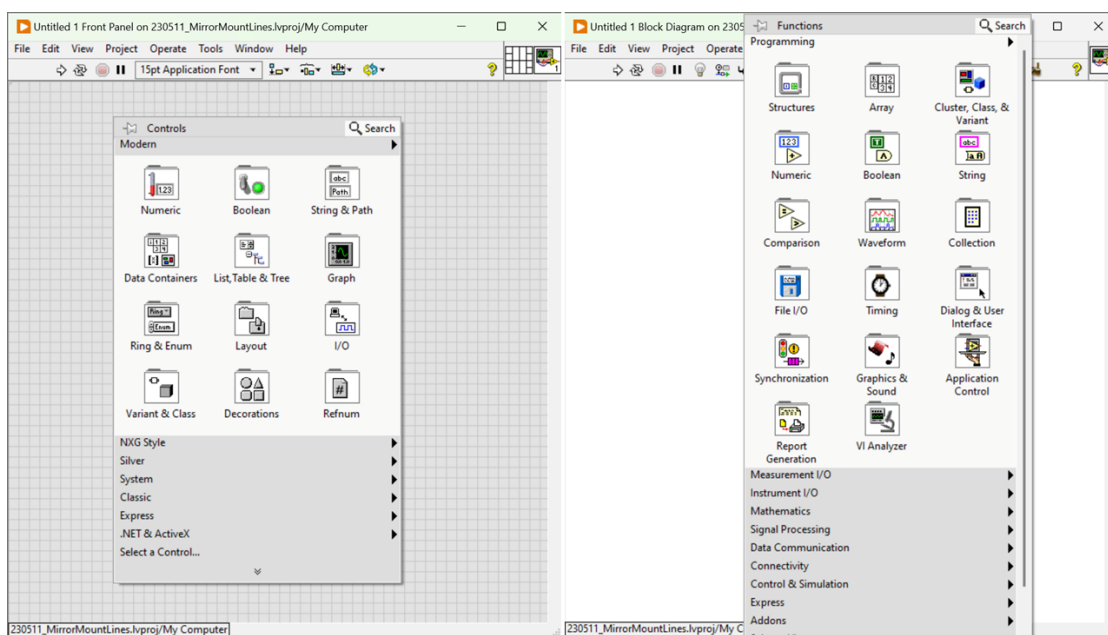
Základní programové vybavení LabVIEW lze rozšířit o širokou paletu přidav-



Obrázek 3.1: Logo firmy National Instruments a vývojového prostředí LabVIEW. Převzato z [17] a [18].

ných modulů. Příklady speciálních modulů pro LabVIEW jsou moduly FPGA (Field programmable gate array), pro programování hradlových polí, Advanced Signal Processing Toolkit, pro pokročilé zpracování signálu, NI-IMAQ pro sběr a zpracování obrazu z kamer, Robotics pro aplikace robotiky, MathScript, který umožňuje zapisovat matematické vzorce do textových polí a mnohé další od společnosti NI. Samozřejmě je taktéž podpora softwaru třetích stran, který dále umožňuje upravit LabVIEW pro specifické potřeby různorodých aplikací, [19].

LabVIEW nabízí grafický přístup k programování, kde pomocí propojování VI programů, logických operací, vstupů a výstupů v blokovém diagramu dochází k vytváření aplikací, které jsou jednoduše ovladatelné pomocí front panelu. Grafická reprezentace těchto dvou částí s rozbalenými paletami funkcí a nástrojů je uvedena na Obr. 3.2.

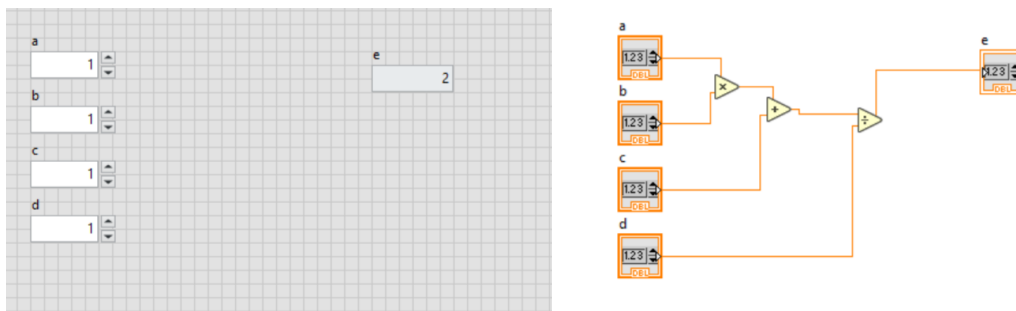


Obrázek 3.2: Paleta funkcí LabVIEW.

Naskýtá se však otázka, čím je LabVIEW jedinečné a jaké přednosti nabízí v porovnání s jinými programovacími jazyky. Hlavní výhodou LabVIEW je široká škála podporovaného hardwaru: měřicí přístroje, napájecí zdroje, funkční generátory, osciloskopy atd. a komunikačních protokolů: RS-232, GPIB (General-Purpose Interface Bus), USB (Univerasal Serial Bus), Ethernet, atd. Toto je možné díky značnému množství ovladačů pro uvedená zařízení a vestavěných funkcí pro práci s těmito komunikačními protokoly.

Společnost National Instruments mimo jiné vyrábí širokou paletu svého vlastního hardwaru, díky čemu se stalo LabVIEW značně populární pro vědecká pracoviště a v high-tech průmyslových odvětvích. Měřená data ze všech uvedených typů přístrojů lze v LabVIEW relativně snadno zpracovávat pouhým propojením mezi jednotlivými dílčími VI.

Pokud by uživatel měl již vytvořen kód v klasických programovacích jazycích, jako C nebo Python, tak má možnost spustit již vytvořený kód pomocí impor-



(a) Vstupy a výstupy pro základní algebraické operace ve front panelu. (b) Algoritmus pro výpočet základních algebraických operací v blokovém diagramu.

Obrázek 3.3: Front panel a blokový diagram pro základní algebraické operace.

tování dynamické knihovny DLL (Dynamic Link Library) v prostředí LabVIEW. Druhou možností je import modulu jazyka Python a zavolání libovolné funkce z tohoto modulu. LabVIEW také podporuje skupiny modulů vytvořené v systému .NET Framework.

Pro praktické seznámení s činností LabVIEW nyní uvedu několik jednoduchých aplikací. Prvním příkladem budou elementární početní aplikace:

$$\left(\frac{a \cdot b + c}{d} \right) = e \quad (3.1)$$

Tato rovnice v prostředí LabVIEW vypadá následujícím způsobem, na Obr. 3.3a je uveden front panel, ve kterém jsou vlevo uvedeny vstupní hodnoty (a,b,c,d) a vpravo hodnota výstupní (e). V blokovém diagramu, Obr. 3.3b je samotný algoritmus výpočtu, algebraické operace mají vzájemnou následnost dle návaznosti algoritmu.

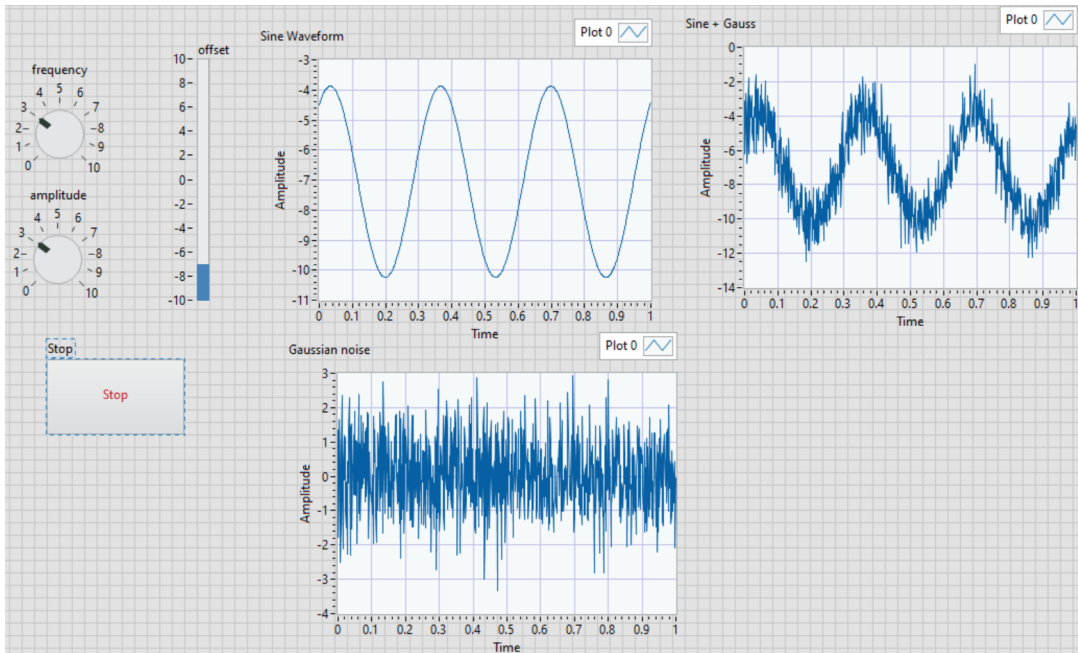
Na tomto příkladu bylo ukázáno, jak vypadají dvě hlavní části práce v LabVIEW. Nyní komplexnější příklad, kde bude vidět jedna z předností tohoto programovacího jazyka - generace harmonického signálu.

Pro generaci signálu má LabVIEW zabudované funkce, pomocí kterých můžeme generovat různé průběhy: čtvercové, trojúhelníkové, pilové a sinové. Zvolil jsem poslední jmenované, u všech výše zmíněných typů průběhů můžeme nastavovat a měnit jejich frekvenci, amplitudu, fázi a posunutí.

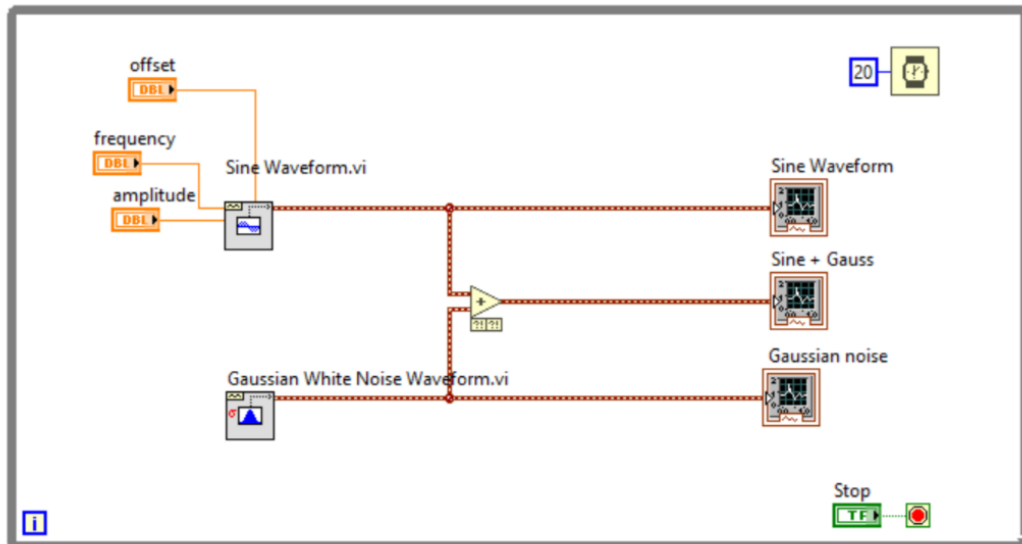
Dalším krokem bylo přidání šumu, opět LabVIEW má mnoho různých druhů šumů, které odpovídají následujícím pseudonáhodným rozdělením: Gaussově, Poissonově, Binomickému, Gama, Bernoulliho a mnohým dalším. Pro tuto demonstraci jsem zvolil Gaussovo rozdělení.

Posledním krokem tedy bylo sinový signál a gaussovský šum spojit, jak již bylo v předchozím příkladě názorně ukázáno, vstupy a výstupy se kterými pracujeme je nacházejí ve front panelu a samotný algoritmus v blokovém diagramu. Obě schémata jsou uvedena na Obr. 3.4 a 3.5.

V blokovém diagramu jsem vytvořil generace signálu a šumu a spojil je, jelikož chceme kontinuální signál, použil jsem cyklus *while*, jehož zastavení ovládáme z front panelu tlačítkem STOP.



Obrázek 3.4: Vstupy a výstupy pro příklad generace harmonického signálu se šumem.



Obrázek 3.5: Algoritmus pro generaci harmonického signálu se šumem.

Z tohoto příkladu je patrné, že vývojové prostředí LabVIEW nabízí poměrně jednoduchým způsobem možnosti, které by byly v jiných programovacích jazycích jen obtížně realizovatelné.

3.2 Kinematický držák zrcadla

Jak již bylo zmíněno, snahou je dosáhnout určitého stupně automatizace. K dosažení tohoto cíle nám poslouží kinematický držák zrcadla, ke kterému jsou připevněné dva krokové motory, jeden pro každý stupeň volnosti. Krokové motory a mechanika držáku převádějí rotační pohyb motoru na lineární posun, který následně nakloní zrcadlo. Mnou používané kinematické držáky pocházely od Litevské společnosti Standa a nesly označení 8MBM24-1-2, viz Obr. 3.6, základní technické parametry jsou uvedeny v Tab. 3.1.



Obrázek 3.6: Kinematický držák zrcadla 8MBM24-1-2. Převzato z [22].

Tabulka 3.1: Základní technické parametry kinematického držáku 8MBM24-1-2. Převzato z [22].

Průměr optického prvku	25.4 mm
Úhlové rozlišení	$< 1''$ ($4.85 \cdot 10^{-3}$ mrad)
Celkový rozsah náklonu	$\pm 4.5^\circ$ (78.54 mrad)
Celkový rozsah lineárního pohybu	8 mm
Délka jednoho kroku	$1.25 \mu\text{m}$
Celkový počet kroků	6400
Počet kroků na otočku motoru	200

V těchto držácích byly použity zmíněné krokové motory, ty se skládají ze dvou základních částí: rotoru (rotační část) a statoru (stacionární část). K pohybu dochází

střídavým průchodem elektrického proudu přes jednotlivé cívky statoru, což vede ke generaci rotačního magnetického pole, které interaguje s permanentními magnety v rotoru a tím dochází k rotačnímu pohybu, který je následně převeden mechanikou držáku na pohyb lineární. Tento lineární pohyb následně slouží k nastavení náklonu jednotlivých os kinematického držáku.

Krokové motory se dělí na dva typy: unipolární a bipolární. Oba tyto typy krokových motorů mají dvě vinutí. Unipolární motory mají navíc vyveden střed od každého vynutí, což z historického hlediska vedlo k jednoduššímu řízení těchto motorů a nižší ceně budiče (vysoká cena tranzistorů). V principu mají unipolární motory nižší točivý moment (v jednom okamžiku prochází proud pouze půlkou vinutí), proto dnes převažují motory bipolární.

Další dělení týká samotných kroků, ty mohou být následující: plné kroky (full step), poloviční kroky (half step) a mikrokroky (microstep). Mikrokrokování se používá za účelem získání vyššího rozlišení polohy a plynulejšího pohybu při malých rychlostech. Princip mikrokrokování spočívá v napájení cívek, tak aby proud procházející cívkami se postupně měnil a ideálně měl sinový průběh, kde každá z cívek má proud posunutý o $\frac{\pi}{2}$ (90°), viz Obr. 3.7.

Pro ovládání krokových motorů jsem nejprve používal kontrolér vyvinutý na katedře fyzikální elektroniky FJFI, viz Příloha 4.5. Ale z důvodu nemožnosti řízení proudu motory jsem následně používal originální kontrolér od společnosti Standa Two Axis Controller 8SMC5-USB-B9-2, technické specifikace tohoto zařízení jsou uvedeny v Tab. 3.2.

Tabulka 3.2: Základní technické parametry kontroléru 8SMC5-USB-B9-2. Převzato z [24].

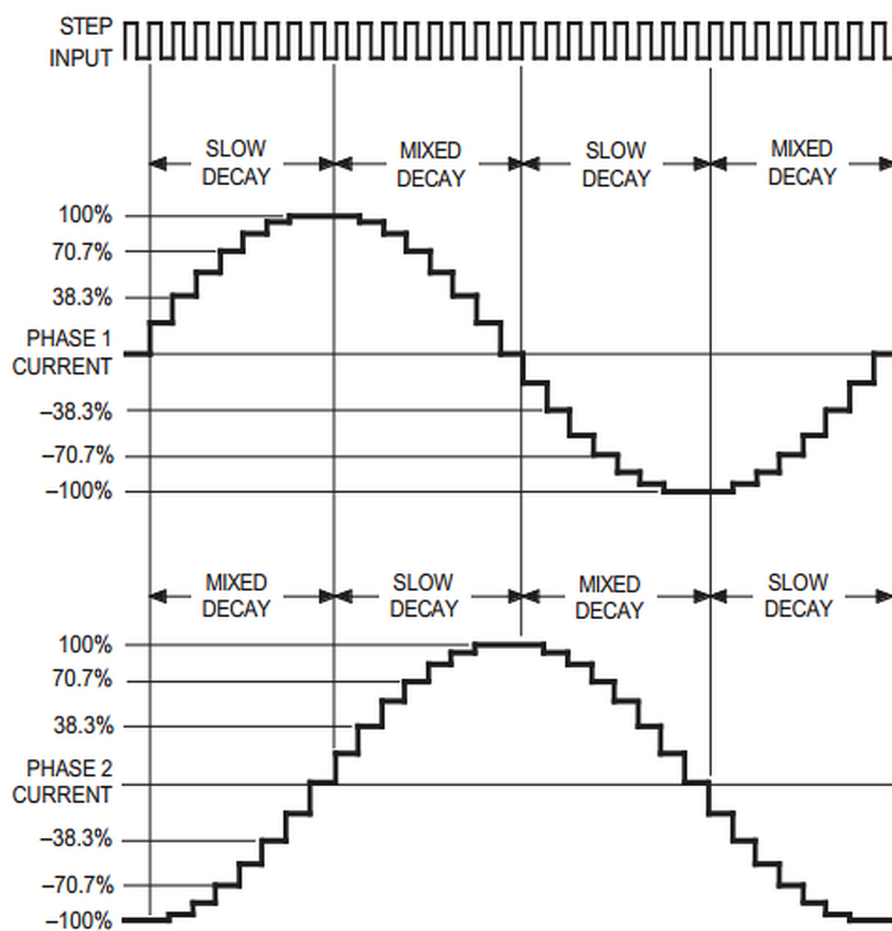
Proud	0.1 - 3 A
Napětí	2 - 48 Vdc
Dělení kroků	1 až 1/256
Maximální rychlost	35000 kroků/s
Pracovní teplota	do 70 °C
Programovatelnost	C++, C#, .NET, Delphi, Visual Basic, gcc, Xcode, Matlab, Java, LabVIEW, Python.

K jeho ovládání se dá využít dodané grafické rozhraní XILab, ve kterém lze nastavovat parametry, jako jsou výstupní proud, rychlost, zrychlení a dále jsou v něm zakomponované příkazy pro pohyb na danou pozici, případně k pohybu o zvolenou délku kroku, vynulování, či navrácení do počáteční pozice. Nejprve jsem používal toto rozhraní a následně jsem v programu LabVIEW vytvořil podobné rozhraní, které jsem využíval při testování krokových motorů a algoritmů pro jejich pohyb.

3.2.1 Měření stability krokového motoru

Základní veličiny krokového motoru (proud, rychlost, zrychlení) jsou mezi sebou provázané, neboť hodnoty dosažitelné rychlosti a zrychlení závisí na hodnotě výstupního proudu budiče, neboli čím vyšší bude výstupní proud tím vyšších hodnot

8 Microstep/Step Operation



Obrázek 3.7: Grafické znázornění nastavení hodnoty proudu v krokovém motoru pro nastavení 8 mikrokroků. Převzato z [23].

rychlostí a zrychlení může motor dosáhnout. Taková je idea, bylo ale nutné ověřit, že nedojde k vynechávání kroků při pohybu. K tomu jsem využil součástky zvané rotační inkrementální enkodér.

Konkrétně jsem použil modulární inkrementální enkodér AMT10E od společnosti CUI Devices. Inkrementální enkodéry generují sérii elektrických impulsů při otáčení, v našem případě otáčení hřídele krokového motoru a pomocí těchto pulsů dochází k přesnému učení polohy motoru. Použitý enkodér generoval 5120 pulzů na jednu otočku.

Nyní k samotné metodě testování stability motoru. Hledaly se hodnoty maximální rychlosti a zrychlení, při kterých krokový motor nevynechá žádný krok. Test probíhal následovně: z klidové polohy motor zrychluje daným zrychlením na zadanou rychlost, kterou se pohybuje po dobu 0.2 sekundy a následně zpomaluje do úplného zastavení. Omezením tohoto postupu je rozsah samotného krokového motoru, který je daný mechanikou držáku a je 6400 kroků. Počet kroků při této podmínce se jednoduše vypočítá podle následujícího vzorce.

$$D = \frac{v^2}{a} + \frac{v}{5} \quad (3.2)$$

kde D je minimální počet kroků, který motor musí urazit, aby byla splněna výše uvedená podmínka, v je maximální rychlost [kroky/s] na kterou motor zrychlí a a je zrychlení motoru [kroky/s²].

V Tab. 3.3 jsou uvedené maximální dosažené kombinace rychlostí a zrychlení pro jednotlivé hodnoty výstupního proudu. Kompletní naměřená data jsou uvedena v sekci Přílohy.

Tabulka 3.3: Nejvyšší dosažené kombinace hodnot rychlostí a zrychlení pro jednotlivé hodnoty proudu.

Proud [mA]	Rychlost [kroky/s]	Zrychlení [kroky/s ²]
600	6800	12000
500	6000	10000
400	2000	6000
300	1000	10000
200	400	2500

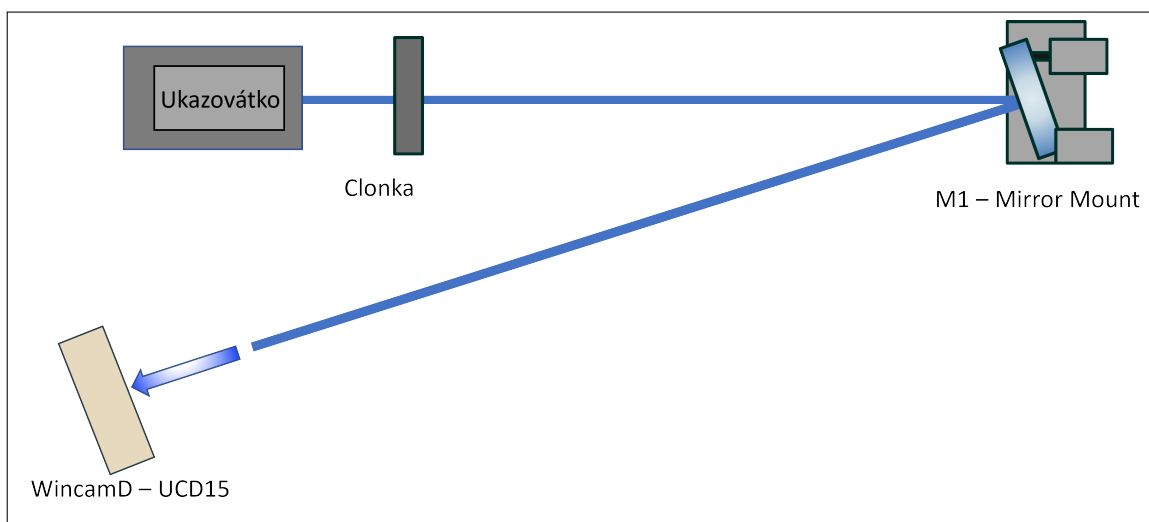
3.2.2 Vliv teploty krokového motoru

Jak je z Tab. 3.3 patrné, nejvyšších hodnot pro rychlost a zrychlení dosahují krokové motory, při nejvyšším možném proudu – 600 mA, což jsem očekával. Co je nyní nutné uvažovat, je skutečnost že při proudu 600 mA dojde ke značnému zahřátí krokových motorů a vyvstává otázka, jaký bude vliv teploty na stabilitu měření, z důvodu tepelných deformací kinematického držáku. Laserové rezonátory jsou citlivé na rozladění a pokud by vliv deformací vlivem zahřívání byl značný, mohlo by docházet k rozladění již naladěného laseru během měření. Z tohoto důvodu jsem na laserové lavici sestavil měřicí sestavu, její schéma je na Obr. 3.8. Sestává se

z laserového ukazovátka, před které jsem umístil clonku, tímto jsem se snažil docílit kruhového tvaru svazku. Laserový paprsek vycházející z ukazovátka se odráží od zrcadla umístěného v kinematickém držáku na kameru WincamD-UCD15. Data z kamery, konkrétně je vypočtena pozice těžiště svazku, jsou zpracována v programu v LabVIEW.

Jak již bylo v této kapitole zmíněno celkový rozsah krokového motoru je 6400 kroků, pro lepší představu o rozsahu rozladění, pro měřicí sestavu na Obr. 3.8, došlo při pohybu krokového motoru o 1 krok k posunu místa dopadu svazku na kameře o $26 \mu m$, jelikož známe počáteční vzdálenost zrcadla od kamery a úhel dopadu, můžeme pomocí funkce tangens (viz vzorec 3.3) snadno spočítat úhlové rozladění, viz Tab. 3.4.

$$\tan \alpha = \frac{a}{b} \quad (3.3)$$



Obrázek 3.8: Měřicí testovací sestava postavená pro měření stability svazku na zahřívání kinematického držáku.

Tabulka 3.4: Vliv posunu krokového motoru na úhlové rozladění.

Počet kroků	Posun [μm]	α [mrad]
1	26	$5.58 \cdot 10^{-3}$

Měření probíhalo následovně, k jednomu z krokových motorů jsem připevnil odporové teplotní čidlo pro měření teploty, odpor tohoto čidla byl měřen multimetrem Aim-TTi 1908P. Dále jsem zrcadlo umístěné v kinematickém držáku nastavil pomocí krokových motorů tak, aby odražený laserový svazek dopadal na čip kamery, ze které docházelo k vyčítání dat a jejich vizuálnímu zobrazení. Po těchto přípravách jsem v rozhraní XILab nastavil proud procházejícími oběma motory na 0 mA a nechal teplotu ustálit, po dosažení konstantní teploty jsem zvýšil úroveň procházejícího proudu a čekal, dokud se teplota neustálí, během těchto měření jsem testoval různé kombinace hodnot proudů pro jeden a dva motory, naměřené výsledky pro stabilitu jsou uvedeny v Tab. 3.5 a 3.6, v Tab. 3.7 a 3.8 je uvedena teplota, na které se držák

ustálil a čas potřebný k tomuto ustálení. Grafická reprezentace naměřených hodnot pro proud 400 mA při obou zapnutých motorech je uvedena na Obr. 3.9.

Tabulka 3.5: Vliv změny teploty na stabilitu svazku při daném vstupním proudu a jednom zapnutém motoru.

Proud [mA]	ΔT [$^{\circ}C$]	α_x [mrad]	Δx [kroky]	α_y [mrad]	Δy [kroky]
600	13.7	$2.28 \cdot 10^{-2}$	4.11	$1.54 \cdot 10^{-2}$	2.77
500	9.5	$1.53 \cdot 10^{-2}$	2.75	$7.18 \cdot 10^{-3}$	1.29
400	6.1	$1.00 \cdot 10^{-2}$	1.80	$4.20 \cdot 10^{-3}$	0.76
300	3.2	$6.79 \cdot 10^{-3}$	1.22	$2.51 \cdot 10^{-3}$	0.45

Tabulka 3.6: Vlivu změny teploty na stabilitu svazku při daném vstupním proudu a obou zapnutých motorech.

Proud [mA]	ΔT [$^{\circ}C$]	α_x [mrad]	Δx [kroky]	α_y [mrad]	Δy [kroky]
500	13.5	$2.37 \cdot 10^{-2}$	4.27	$1.81 \cdot 10^{-2}$	3.25
400	10.6	$7.53 \cdot 10^{-3}$	1.35	$1.49 \cdot 10^{-2}$	2.69

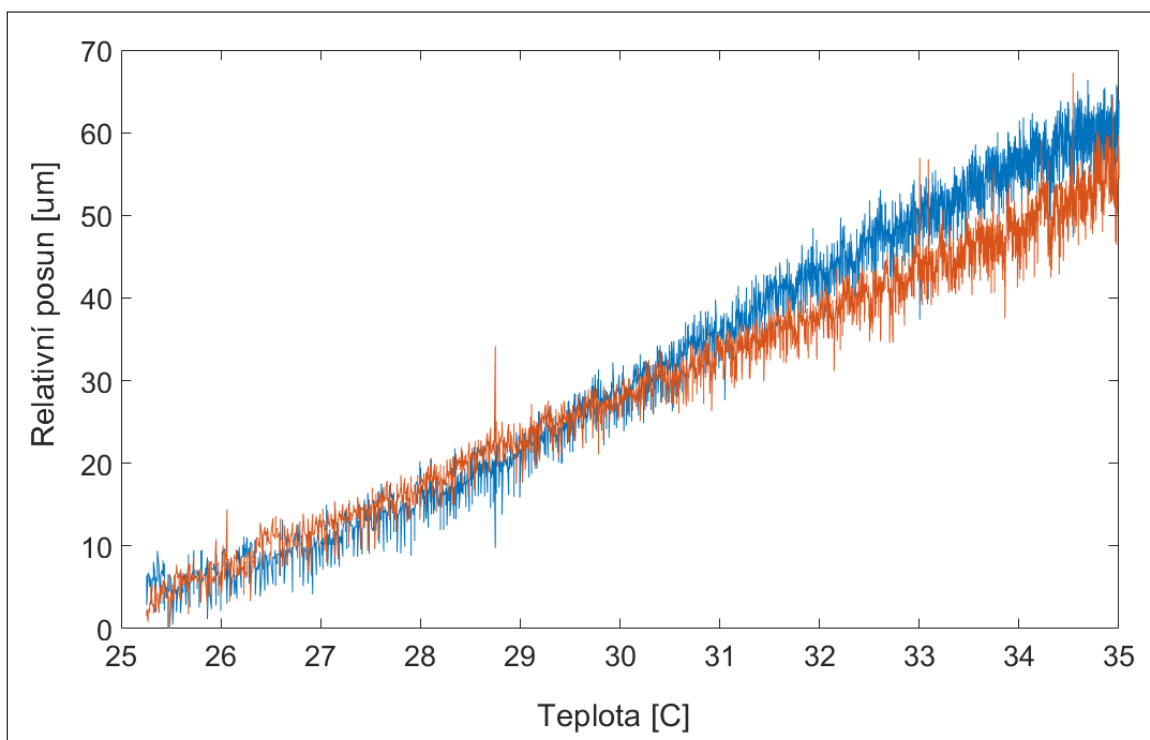
V případě, kdy maximální proud (600 mA) procházel jedním z krokových motorů, zahřátí kinematického držáku způsobilo, vychýlení svazku v horizontální ose $\alpha_x=2.28 \cdot 10^{-2}$ [mrad] a ve vertikální ose $\alpha_y=1.54 \cdot 10^{-2}$ [mrad], tedy na vzdálenosti 47 cm došlo k posunu na kameře v horizontální ose o 107 μm a ve vertikální o 72 μm , což odpovídá pootočení motoru o $\Delta x=4$ kroky, respektive o $\Delta y=3$ kroky.

Pro proud o hodnotě 500 mA, procházející oběma krokovými motory, zahřátí kinematického držáku způsobilo, vychýlení svazku v horizontální ose $\alpha_x=2.37 \cdot 10^{-2}$ [mrad] a ve vertikální ose $\alpha_y=3.25 \cdot 10^{-2}$ [mrad], tedy na vzdálenosti 47 cm došlo k posunu na kameře o v horizontální ose o 119 μm a ve vertikální o 76 μm , což odpovídá pootočení motoru o $\Delta x=4$ kroky, respektive o $\Delta y=3$ kroky. Menší proud, ale oběma motory způsobil podobné vychýlení svazku jako maximální proud jedním motorem.

Tabulka 3.7: Doba potřebná pro ustálení teploty při zapnutém jednom krokovém motoru.

Proud [mA]	Δt [min]	T [$^{\circ}C$]
600	18:28	38.9
500	23:50	34.3
400	23:48	30.2
300	14:20	27.2

Jak je z uvedených dat patrné, vliv zahřívání kinematického držáku od krokových motorů nemůže být jednoduše ignorován, ale musí být brán v potaz. Jako řešení se nabízí před započítáním samotného měření nechat kinematický držák vyhrát. Dojde k ustálení teploty a následná měření budou oproštěna od této chyby. Z tohoto důvodu jsem měřil potřebný čas na ustálení teploty držáku pro různé kombinace proudů Tab. 3.7 a 3.8.



Obrázek 3.9: Vývoj závislosti posunu svazku v obou osách na teplotě kinematického držáku zrcadel při nastavení hodnoty proudu na 400 mA pro oba krokové motory.

Tabulka 3.8: Doba potřebná pro ustálení teploty při zapnutých obou krokových motorech.

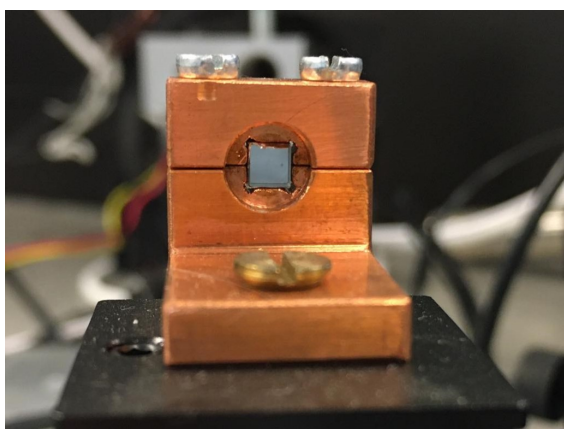
Proud [mA]	Δt [min]	T [°C]
500	31:56	38.8
400	33:24	36.1

Kapitola 4

Vyvinuté laserové systémy a jejich optimalizace

4.1 Součásti laserových systémů

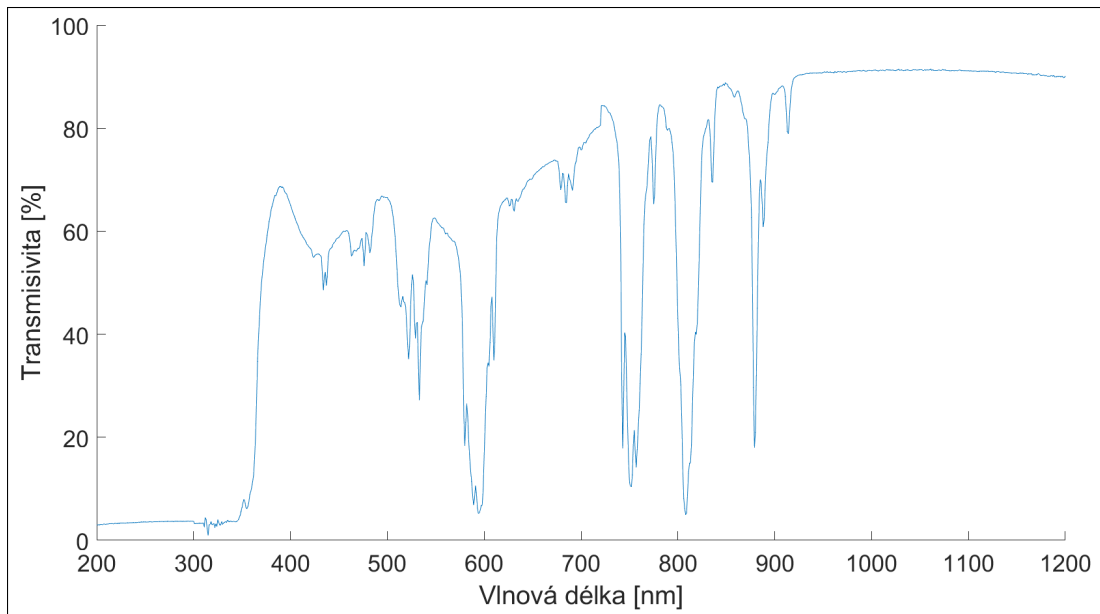
Laserový krystal $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ s dopací 1%, který jsem použil je zobrazen na Obr. 4.1. Rozměr krystalu je $3 \times 3 \times 3$ mm a byl vyroben společností Foctek, Čína.



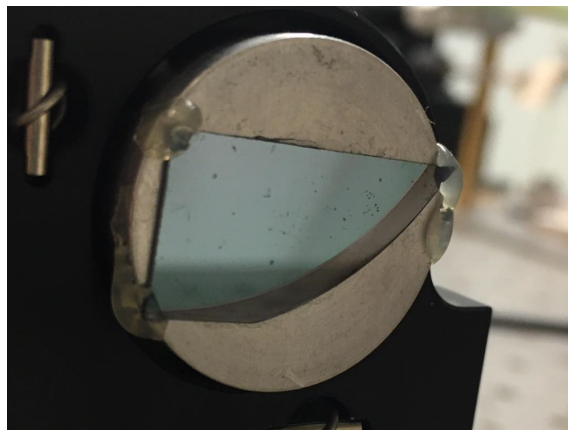
Obrázek 4.1: Krystal $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ v držáku, který byl použit jako aktivní prostředí v laserových systémech.

Na Obr. 4.2 je zachycen průběh transmisivity použitého krystalu pro rozsah vlnových délek 200-1200 nm. K tomuto měření jsem použil spektrofotometr Shimadzu UV-3600.

Polovodičový saturovatelný absorbér na zrcadle používaný k dosažení synchronizace módů je zobrazen na Obr. 4.3. Interní označení tohoto absorbéru je MQ1486 a byl vyroben na univerzitě v Albuquerque, Nové Mexiko, USA. Hloubka modulace je přibližně 1 %, ostatní parametry nejsou známy.



Obrázek 4.2: Průběh závislosti transmise krystalu $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ na vlnové délce, změřený pomocí spektrofotometru Shimadzu UV-3600.



Obrázek 4.3: Použitý polovodičový saturevatelný absorbér na zrcadle.

4.2 Optimalizace laserových systémů bez automatického nastavení

Laserový rezonátor obvykle optimalizujeme tak, aby bylo generováno laserové záření s nejvyšším výkonem. V rámci procesu optimalizace hledáme výstupní zrcadlo s optimální reflektivitou, které zavádí do rezonátoru optimální zpětnou vazbu. Dále je zapotřebí optimalizovat polohu a vzájemné nastavení (náklon) zrcadel. Prvním krokem je takový rezonátor naladit. Značně si ulehčíme práci, pokud využijeme laserového ukazovátka, které umístíme a nastavíme před výstupní zrcadlo. Laserový paprsek směřujeme skrz výstupní zrcadlo na aktivní krystal a pomocí šroubů s jemným stoupáním na jednotlivých optických komponentech (držácích zrcadel) nastavíme zpětný odraz zpět na ukazovátka. Po zapnutí budícího laseru pak stačí případně provést jemné korekce v nastavení optických komponent a laser je naladěn.

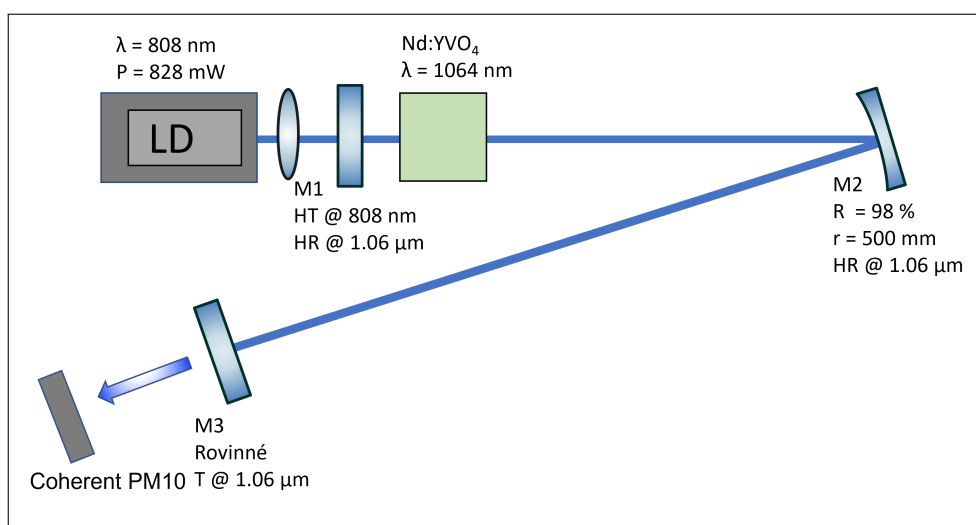
Tabulka 4.1: Nejvyšší dosažené výstupní výkony pro zrcadla s různou reflektivitou v rezonátoru typu V.

Reflektivita [%]	Maximální výstupní výkon[mW]	Účinnost [%]
92	187	22.8
86	218	26.6
83	225	27.4
82	226	27.6
70	200	24.4

Ideálním stavem je získat svazek s Gaussovským profilem, bohužel ve většině případů po naladění laseru vidíme příčné módy vyšších řádů, k jejich eliminaci dojde donastavením zrcadel pomocí šroubů s jemným stoupáním na držácích zrcadel.

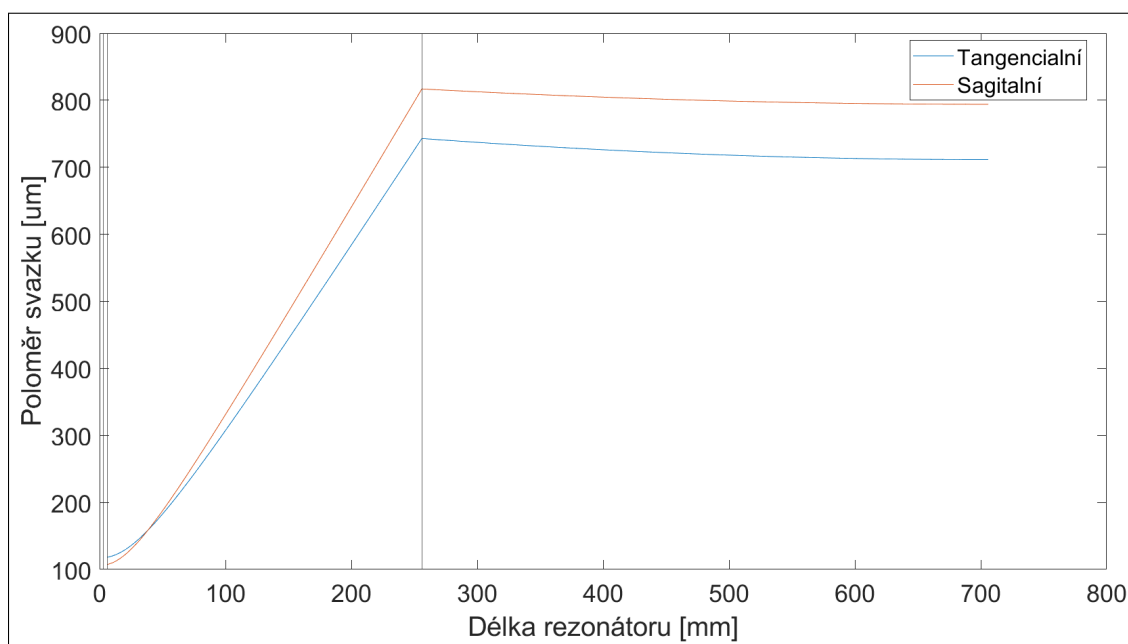
4.2.1 Rezonátor typu V

Pro první diodově čerpaný pevnolátkový laser, který jsem sestavil, jsem využil rezonátoru typu V, jeho schéma je uvedeno na Obr. 4.4. Rezonátor jsem navrhl v programu ReZonator [20], viz Obr. 4.5.

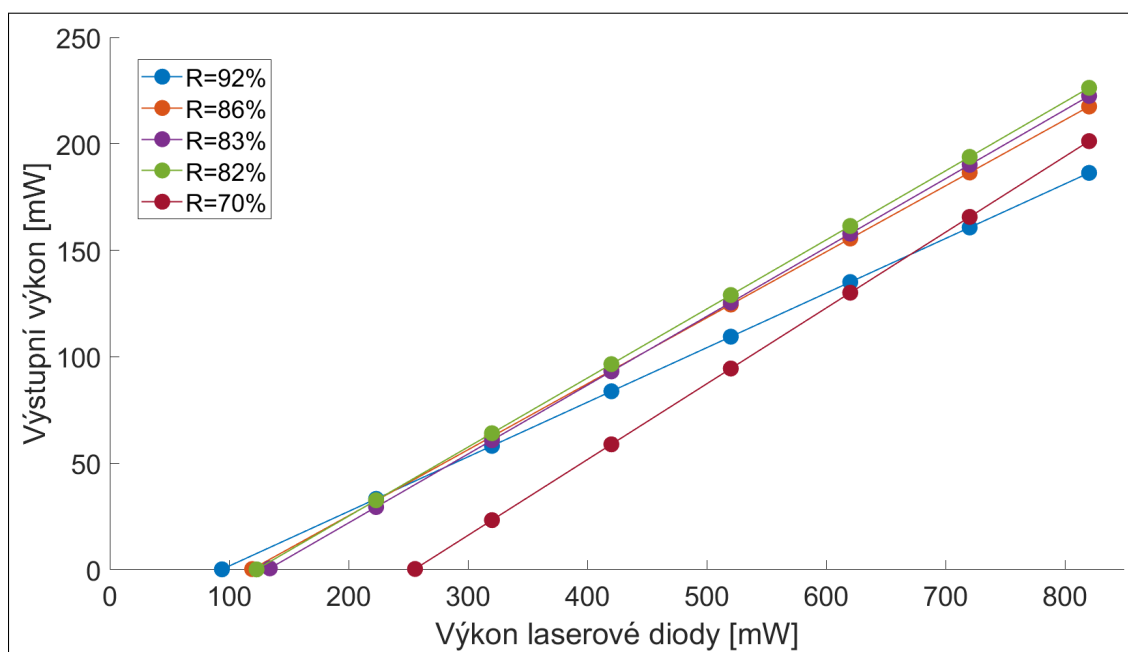


Obrázek 4.4: Schéma rezonátoru typu V se senzorem výkonu PM10.

Naměřené hodnoty výstupního výkonu laserového rezonátoru typu V pro jednotlivá výstupní zrcadla jsou uvedeny v Obr.4.6. V Tab.4.1 jsou uvedeny maximální hodnoty výstupního výkonu pro jednotlivá výstupní zrcadla.



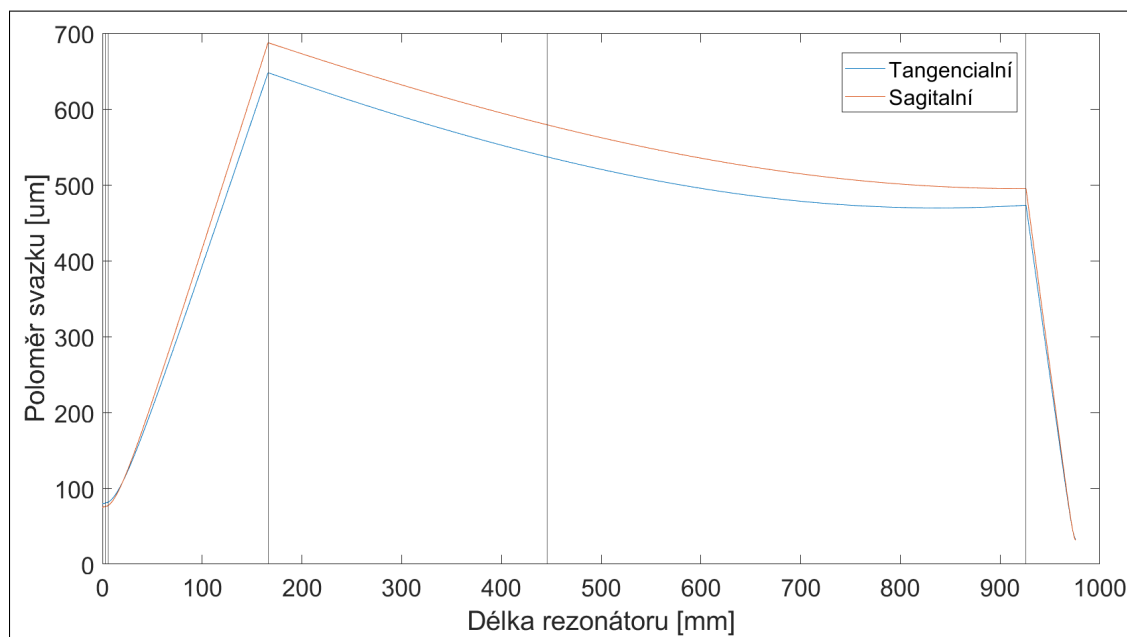
Obrázek 4.5: Průběh velikosti svazku v laserovém rezonátoru typu V.



Obrázek 4.6: Naměřené hodnoty výstupních výkonů pro zrcadla s různou reflektivitou pro rezonátor typu V.

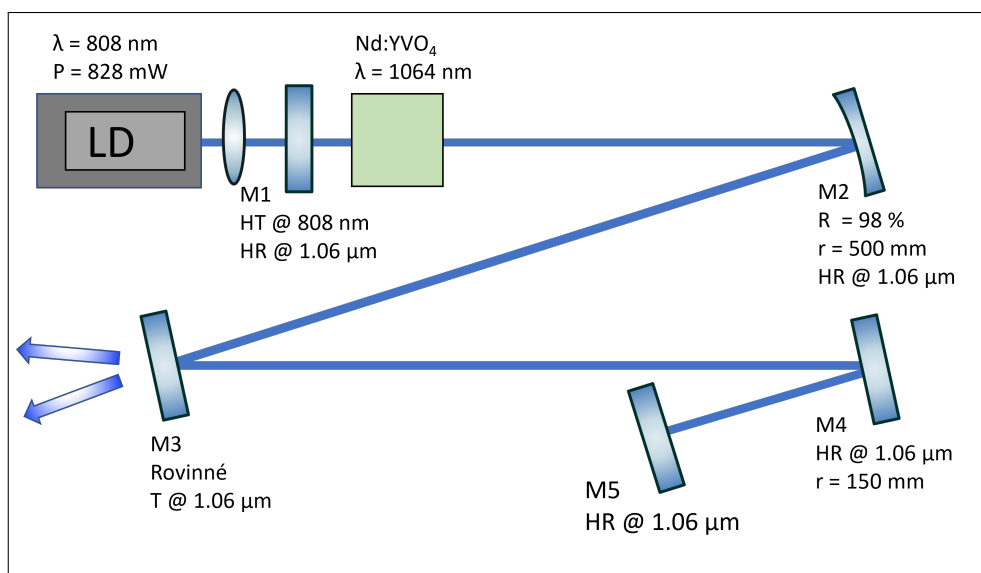
4.2.2 Rezonátor typu Z

Rezonátory typu Z jsou často používány, když chceme dosáhnout mode lockingu pomocí pasivního saturevatelného absorbéru na zrcadle (SESAM). Tento typ rezonátoru obvykle zahrnuje dvě dutá kulová zrcadla a umožňuje nezávisle nastavit poloměr základního příčného módu v aktivním prostředí a na saturevatelném absorbéru. Tímto způsobem lze dosáhnout splnění podmínky pro stabilní synchronizaci módů a zároveň zajistit, aby nedocházelo k poškození saturevatelného absorbéru vysokými špičkovými výkony uvnitř rezonátoru. Rezonátor jsem navrhl v programu ReZonator [20], viz Obr. 4.7.



Obrázek 4.7: Naměřené hodnoty výstupních výkonů pro zrcadla s různou reflektivitou pro rezonátor typu Z.

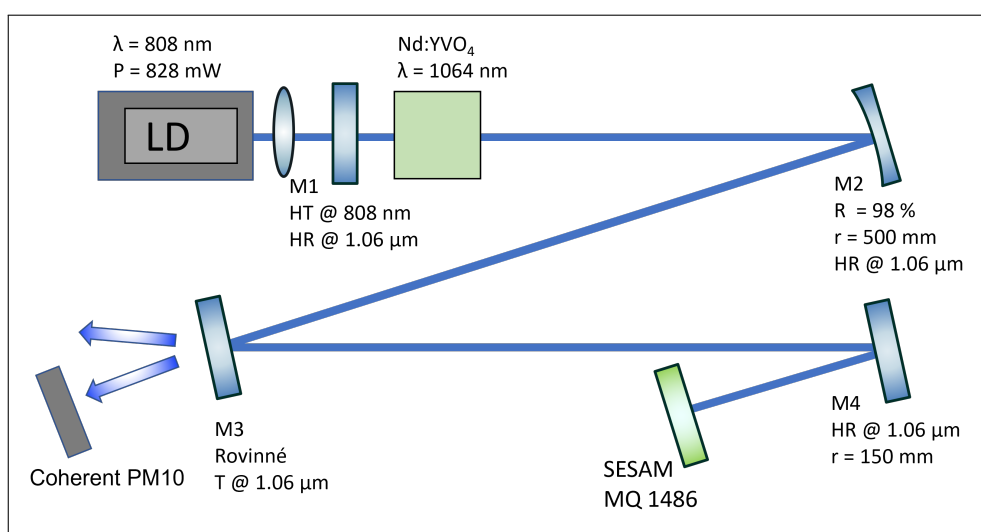
Schéma rezonátoru typu Z bez saturevatelného absorbéru je uvedeno na Obr. 4.8. Oproti rezonátoru typu V došlo k přidání zrcadel M4 a M5. Po nastavení rezonátoru byl na místo zrcadla M5 vložen saturevatelný absorbér na zrcadle, viz schéma na Obr. 4.9. Výstupní výkon byl měřen pro jeden ze dvou výstupních svazků, celkový výstupní výkon by tedy měl být přibližně dvojnásobný viz Obr. 4.11.



Obrázek 4.8: Schéma rezonátoru typu Z.

4.2.3 Mode locking

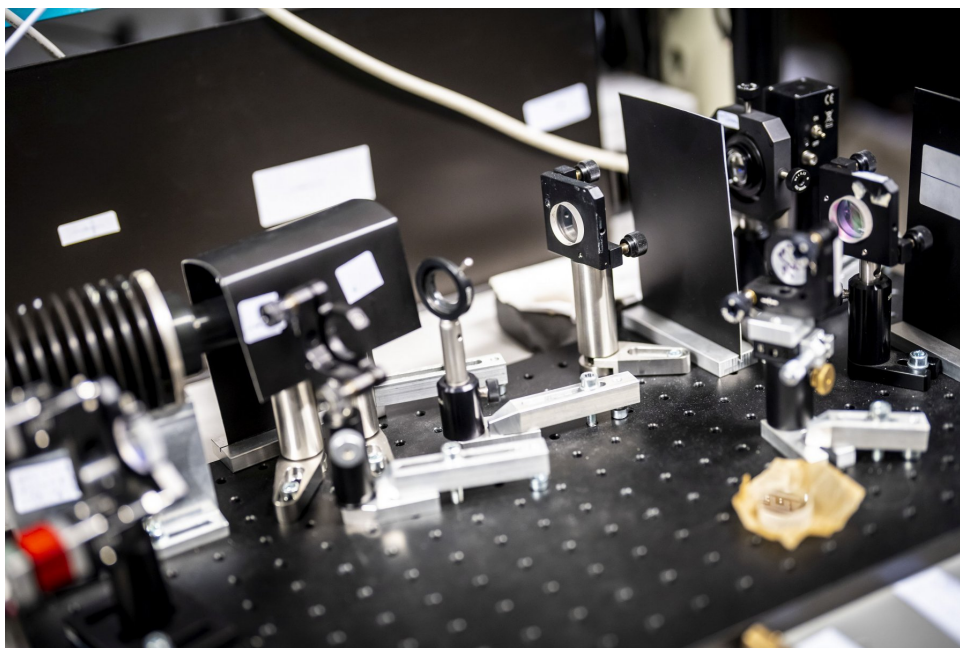
Jak již bylo zmíněno výše, pro generaci v režimu synchronizace módů jsem nahradil zrcadlo M5 za polovodičový saturovatelný absorbtér na zrcadle, viz schéma na Obr. 4.9. Laserový systém sestavený dle tohoto schématu je na Obr. 4.10.



Obrázek 4.9: Schéma rezonátoru typu Z s polovodičovým saturovatelným absorbtérem a s měřičem výkonu Coherent PM10.

Naměřené hodnoty výstupního výkonu pro výstupní zrcadla s různou reflektivitou jsou uvedeny na Obr. 4.11. V Tab. 4.2 jsou uvedeny naměřené a vypočtené parametry pro rezonátor typu Z se saturovatelným absorbtérem na zrcadle, čerpaný polovodičovou laserovou diodou. Opakovací frekvence impulsů byla 117 MHz.

Na Obr. 4.12 je zobrazen jeden generovaný impuls, který byl zaznamenán fotodiódou EOT ET3500 připojenou k osciloskopu Teledyne LeCroy SDA813Zi. Naměřená

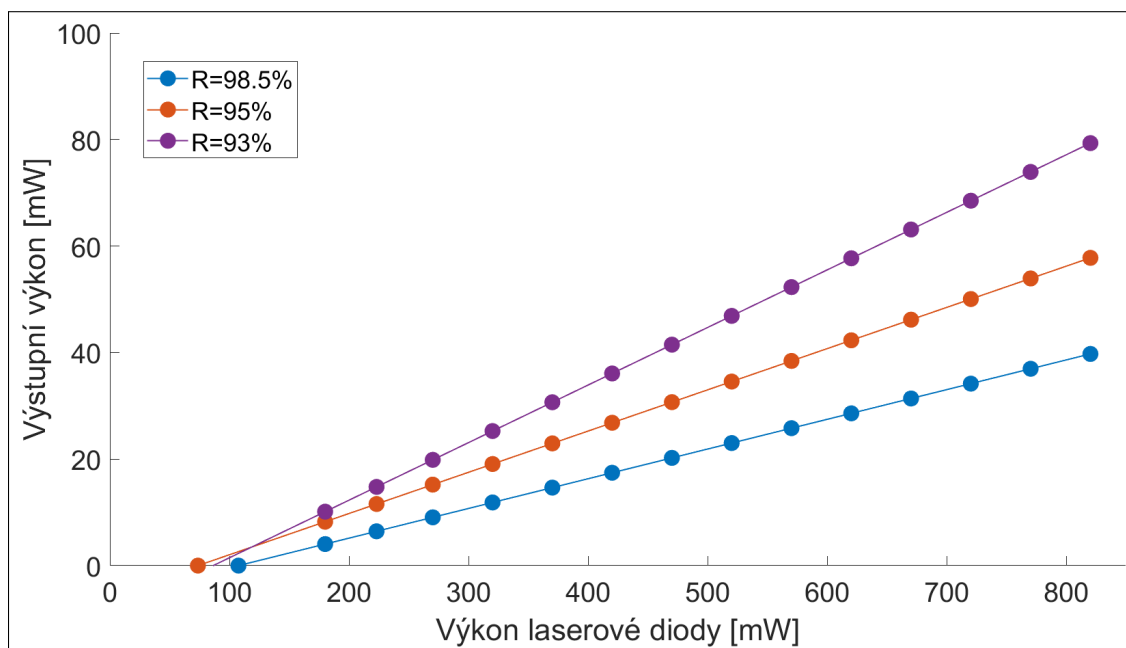


Obrázek 4.10: Sestavený laserový systém pro rezonátor typu Z. Převzato z [21].

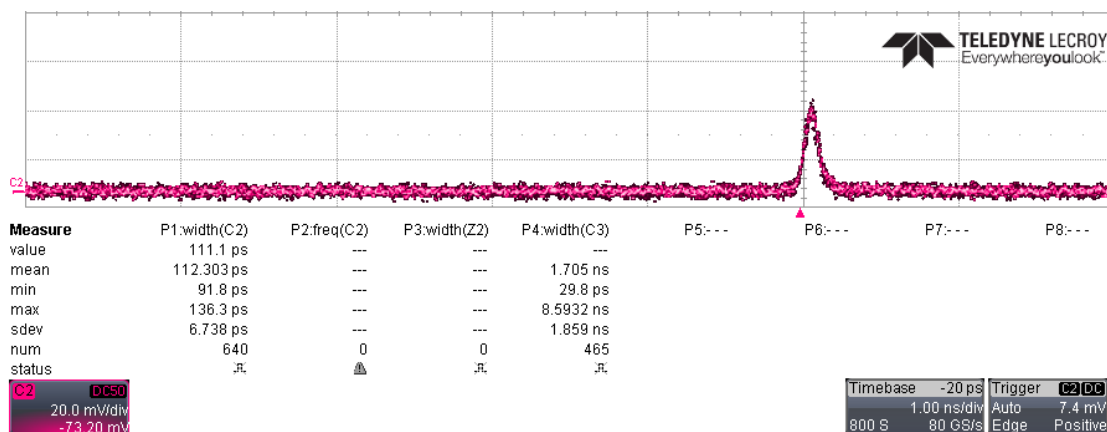
Tabulka 4.2: Naměřené a vypočtené parametry pro rezonátor typu Z s polovodičovým saturevatelným absorberem na zrcadle.

Reflektivita [%]	Maximální výstupní výkon [mW]	Výkon čerpací diody při započítání mode-lockingu [mW]	Účinnost [%]
98.5	40.8	775	5.6
96	57.8	797	7.8
93	82	793	10.8

délka impulsu je 111 ps. Je třeba poznamenat, že laserový systém nebyl optimalizován pro generaci co nejkratších impulsů.



Obrázek 4.11: Naměřené hodnoty výstupních výkonů pro zrcadla s různou reflektivitou pro rezonátor typu Z, pro jeden výstupní svazek, při použití SESAM místo zrcadla M5.



Obrázek 4.12: Impuls generovaný pomocí metody mode-locking, zachycen na osciloskopu Teledyne LeCroy SDA813Zi.

4.3 Použití kinematického držáku zrcadla pro optimalizaci laserových systémů

V předešlé části jsem se věnoval nastavování laseru a jeho optimalizací pomocí "tradičního postupu". Každý optický prvek v laseru má dva stupně volnosti, ve kterých můžeme měnit jeho polohu. Ideálem je nastavit všechny optické komponenty tak, aby čerpací laserový svazek prošel celým systémem a následně se odrazil a dopadal na krystal. Tento tradiční postup využívá ručního ladění pomocí postupné optimalizace jednotlivých optických prvků. Pro ladění a následnou optimalizaci rezonátorů typu V a Z je toto platný způsob, avšak se vzrůstající komplexitou systému, případně nutnosti vysoké přesnosti se časová náročnost značně zvyšuje. Z tohoto důvodu by bylo výhodné využít určitého stupně automatizace, ať již k samotnému ladění nebo následné optimalizaci. Kromě možností preciznějšího nastavení se tímto krokem otevírá způsob zefektivnění práce, neboť čas strávený donastavováním jednotlivých optických prvků by místo člověka vykonal softwarový program.

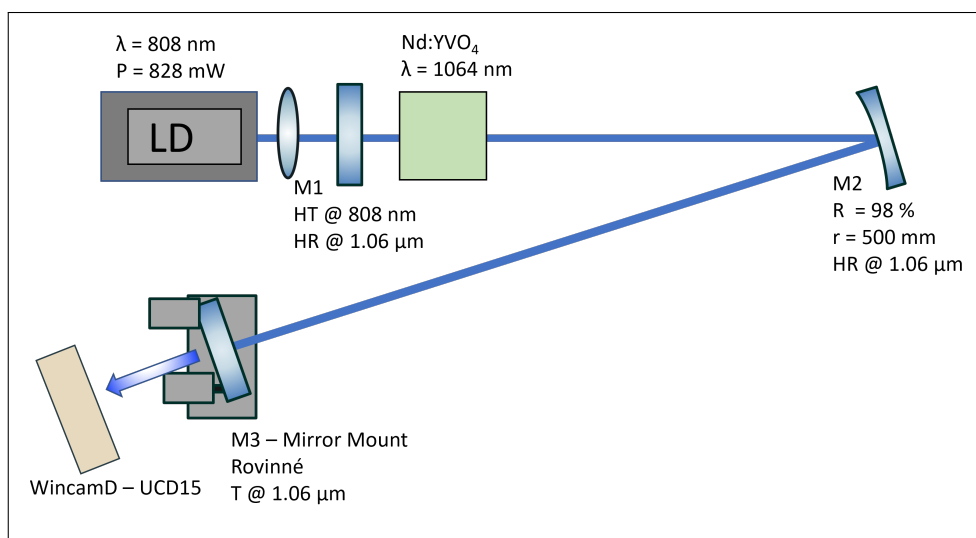
4.3.1 Optimalizace laserových rezonátorů pomocí automaticky říditelných zrcadel

V předešlé části jsem zmiňoval základní princip ladění laserových rezonátorů. Postup je sice značně přímočarý, avšak i s určitou praxí práce v laboratoři je časově náročný, a to již u ladění rezonátorů typu V. U složitějších typů rezonátorů, ku příkladu již zmiňovaný rezonátor typu Z. Pokud z budící diody vychází záření neviditelné pro lidské oko, třeba mnou používaná dioda, která vyzařuje na vlnové délce 808 nm, je nutné využít přístroje, který nám umožní tuto oblast elektromagnetického záření pozorovat. Osobně jsem v této konkrétní aplikaci využíval infračerveného zobrazovače. Kromě již zmíněné časové náročnosti, jsou zde i komplikace spojené s prací ostatních osob v laboratoři, neboť v případě infračerveného zobrazovače je nutné přitímti až úplná tma, což komplikuje a v některých případech i zcela znemožňuje ostatním práci. Proto se nabízí myšlenka, uvedení určitého stupně automatizace do tohoto procesu.

Problém, který jsem řešil byl následující. Máme kinematický držák zrcadla se dvěma stupni volnosti, ve kterých se může pohybovat díky krokovým motorům. Rozsah pohybu je uveden v Tab. 3.1. Z programovacího pohledu máme 2D pole o rozsahu odpovídajícímu možnému pohybu držáku, pro každou osu je maximální rozsah 6400 kroků.

Pro reálné aplikace nedojde k využití celého rozsahu z důvodu velikostí optických prvků. V testovacím systému, který jsem používal ke své bakalářské práci jsem používal zrcadla o průměru 1 palce (25.4 mm). V testovacím systému Obr. 4.13 jsou zrcadla M2 a M3 od sebe vzdálena 500 mm, na tuto vzdálenost k posunu o 25.4 mm bude potřeba 2062 kroků, tato hodnota odpovídá úhlu 0.068 rad (3.9°).

Uvnitř tohoto pole se bude nacházet místo, kde dojde k naladění laseru. V naměřených datech je toto místo reprezentováno maximem intenzity výstupního záření, neboť používám k získávání hodnot velkoplošnou fotodiodu Thorlabs FDS1010 o rozměrech aktivní plochy 10x10 mm.

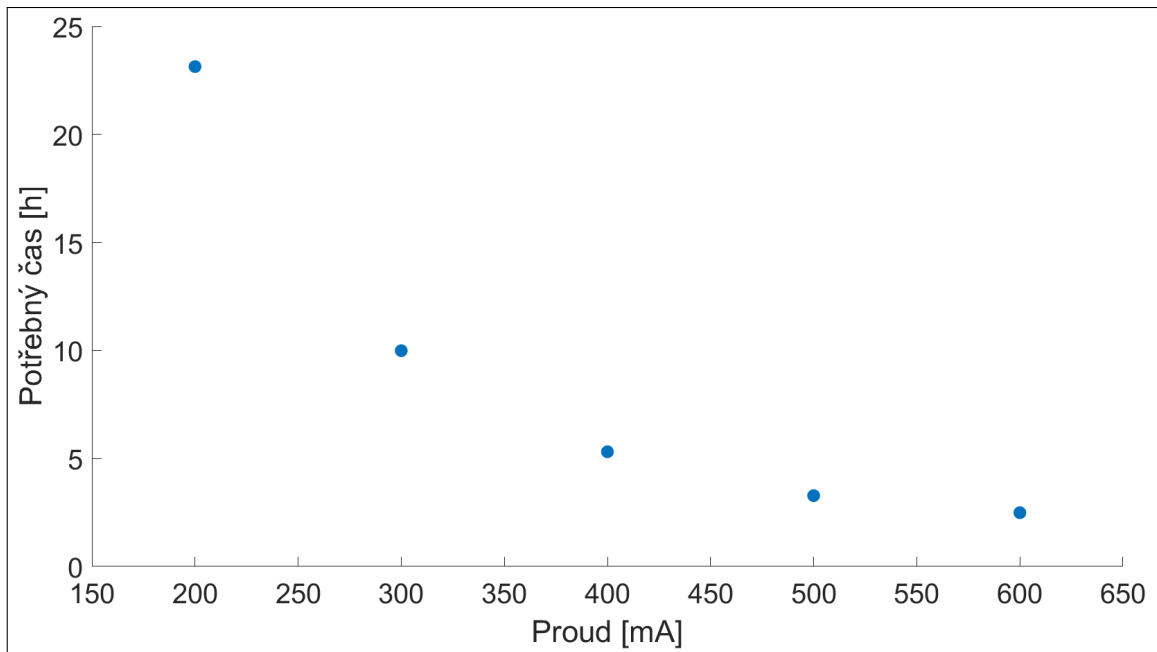


Obrázek 4.13: Schéma sestaveného systému v laboratoři, ve kterém jsem testoval kinematický držák zrcadla v reálných podmínkách.

Nejjednodušší úvahou je nechat motory pracovat tak, aby došlo k naměření souvislého pole hodnot, ve kterém by jednoduše maximum bylo viditelné, tento přístup se potýká s problémem časové neefektivity. Jak je uvedeno na Obr. 4.14, pro pole 5800x5800 kroků je doba potřebná k získání všech hodnot závislá na proudu vstupujícím do motorů, od 2.5 hodiny pro 600 mA až po téměř celý den při 200 mA a to se jedná pouze o jeden optický prvek. Při stejném postupu pro soustavu dvou zrcadel by časová náročnost byla taková, že snaha o automatizaci tímto způsobem by pozbývala smyslu. Proto je nutné přijít s algoritmem, který by tento problém alespoň z části eliminoval. Následující algoritmy budu popisovat v kontextu své bakalářské práce neboli pro problematiku jednoho optického prvku se dvěma stupni volnosti. Aplikace těchto algoritmů pro budoucí komplexnější systémy bude diskutována dále. Komplexnějším systémem se budu věnovat v rámci svého budoucího výzkumného úkolu a diplomové práci.

Úvaha je tedy následující, chceme během co nejkratšího času proskenovat co největší oblast pro nalezení maxima. Krokové motory pracují nejefektivněji, ve smyslu doby potřebné k překonání dané vzdálenosti, pokud dochází k přímočarému pohybu v jednom směru, což v kombinaci s kontinuálním vyčítáním hodnot během pohybu je nesporná výhoda.

Ale nyní postupně k tomu, jakými algoritmy jsem se zabýval. Nejprve ve stručnosti popíšu zvažované metody, ke kterým se následně vrátím a budu zvažovat jejich výhody a nevýhody. Důležité je ještě zmínit, že dále zmiňované křivky jsou ideové reprezentace pohybu odraženého paprsku v rovině krystalu vzniklé pohybem jednotlivých krokových motorů. V případě, kdy jeden motor je v klidu a druhý se pohybuje, odražený paprsek v rovině krystalu vykreslí vodorovnou čáru. Při konstantním periodickém pohybu jednotlivých motorů (první se pohybuje a druhý stojí a naopak) dochází k vykreslení „schodového vzoru“, jehož vrcholy by tvořily diagonálu.



Obrázek 4.14: Závislost potřebné doby pro získání všech hodnot z pole o rozměru 5800×5800 kroků na hodnotě vstupního proudu do krokových motorů.

4.3.2 Algoritmy pro skenování oblasti

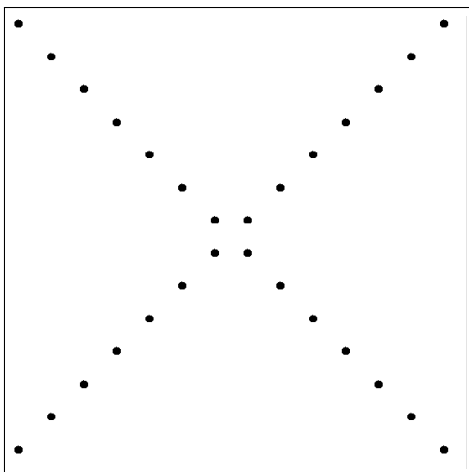
Jak již bylo zmíněno v této konkrétní aplikaci máme jeden optický prvek se dvěma stupni volnosti. O algoritmu tedy musíme uvažovat v tomto kontextu. Chceme tedy, co nejefektivnějším způsobem, z pohledu poměru času a množství nasbíraných dat, získat představu o poli v tuto chvíli plném neznámých hodnot. V případě komplexnějších systémů, se dvěma a více optickými prvky bude tento algoritmus využit k finální optimalizaci systému, neboť v prvním přiblížení budeme hledat alespoň jednu kombinaci nastavení optických prvků takovou, při které dojde k zahájení stimulované emise a začátku činnosti laseru.

Diagonály

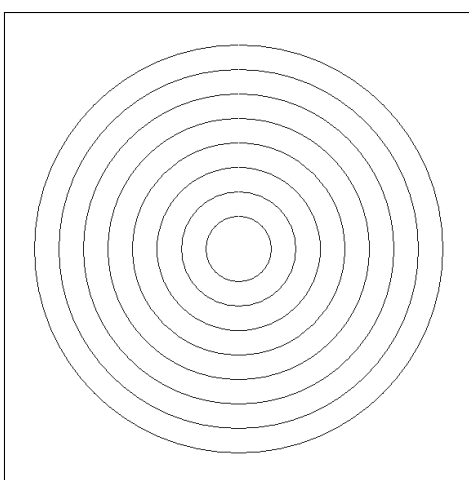
Prvotní ideou bylo pole prohledávat pomocí diagonál. Možností, kterou jsem se zabýval bylo začít od hlavní diagonály s tím, že vykreslené liché a sudé diagonály by byly na sebe vzájemně kolmé, docházelo by k vykreslování obrazců tvaru X, viz Obr. 4.15.

Soustředné kružnice

Další ideou bylo využití soustředných kružnic, se středem v daném bodě a konstantně se zvětšujícím poloměrem, viz Obr. 4.16.



Obrázek 4.15: Schéma pro algoritmus využívající diagonály.



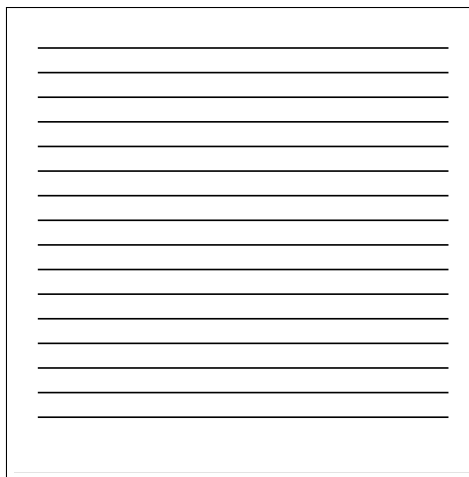
Obrázek 4.16: Schéma pro algoritmus využívající soustředné kružnice.

Úsečky

Poslední ze tří hlavních zvažovaných možností bylo využití vodorovných úseček. Uvažujme, že máme zadané pole o rozměru $a \times a$, a chceme využít vodorovných úseček, viz Obr. 4.17. Dle nastavené hrubosti kroku h určíme počet úseček dle vztahu

$$n = \frac{a}{h}, \quad (4.1)$$

kde n je počet úseček, a délka strany pole v ose y a h zvolená hrubost kroku.



Obrázek 4.17: Schéma pro algoritmus využívající vodorovné úsečky.

Zvažoval jsem tedy výše uvedené typy algoritmů. Důležité je podotknout že kontroléry, které jsem využíval pro ovládání obou krokových motorů, mají tu vlastnost, že pokud chceme zadat novou hodnotu polohy je nutné zaslat příkaz zvlášť každému z krokových motorů. Posílání příkazu trvá určitou dobu, stejně tak i následné vykonání. Tato doba se pohybuje v řádu jednotek až desítek milisekund. Ve zvažovaném algoritmu soustředných kružnic, by tedy bylo nutné posílat souřadnice polohy bod po bodu, což způsobilo extrémní snížení pracovní rychlosti motoru. Podobný problém nastal i v případě bodů na diagonálách. Z tohoto důvodu jsem v rámci své bakalářské práce jsem se nadále věnoval algoritmu na principu vodorovných úseček, u kterých dochází pouze k zadání souřadnic koncového bodu každé jednotlivé osy úsečky.

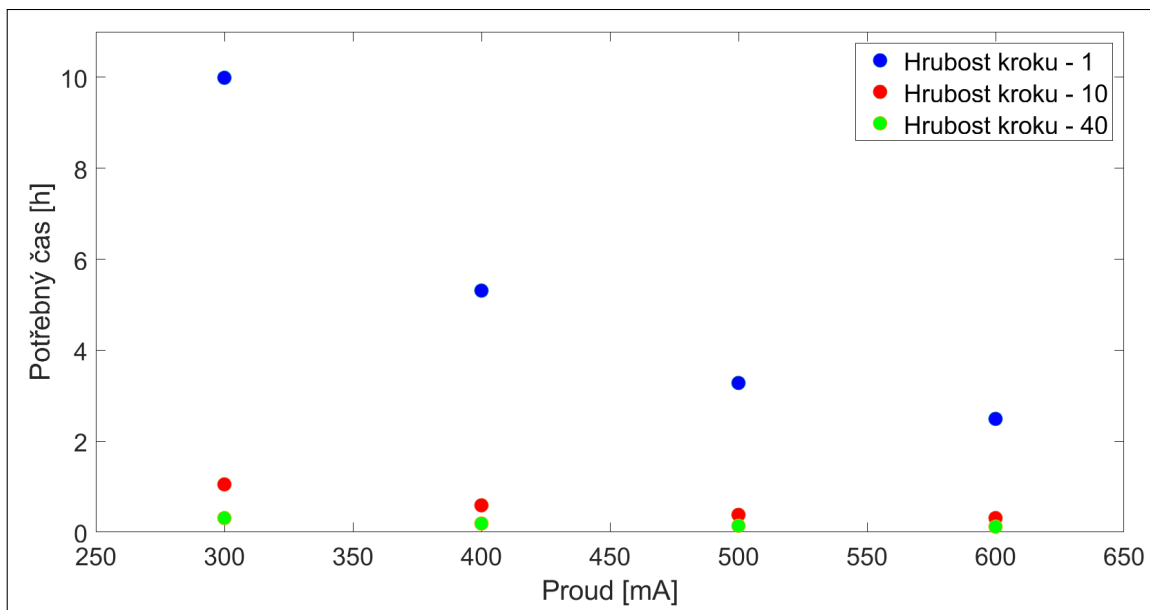
Na Obr. 4.18 je uvedeno porovnání časové náročnosti pro nalezení maxima výstupní intenzity pro případ zjištění všech hodnot z pole o rozměru 5800×5800 kroků a dále při využití algoritmu úseček pro dvě různé hrubosti kroku při prvotním prohledání s následným nastavením jemnějšího kroku pro oblast, která je pro nás zajímavá.

Jak je vidět na Obr.4.18, pomocí zvolení hrubé hodnoty kroku pro prvotní prohledání pole a následně jemnějšího kroku pro oblast, která nás zajímá, dojde ke značné úspoře času.

Katedra připravuje nový typ kontroléru, který by příkazy neposílal jednotlivě, ale docházelo by k řazení do fronty, tudíž jejich vykonávání by proběhlo v řádu mikrosekund. V rámci svého výzkumného úkolu chci tento nový typ kontroléru použít k porovnání efektivity ostatních dvou typů algoritmů v porovnání s algoritmem vodorovných úseček a následně jej použít v kontextu komplexnějších systémů s vyšším počtem stupňů volnosti.

4.4 Řešené výzvy

Při práci s krokovými motory a k tomu potřebnou elektronikou jsem se setkal s různými problémy a komplikacemi, nyní uvedu nejzávažnější z nich a jak došlo k jejich



Obrázek 4.18: Porovnání časové náročnosti pro různé hrubosti kroku při prohledání, resp. prvotním prohledání pole o rozměru 5800×5800 kroků.

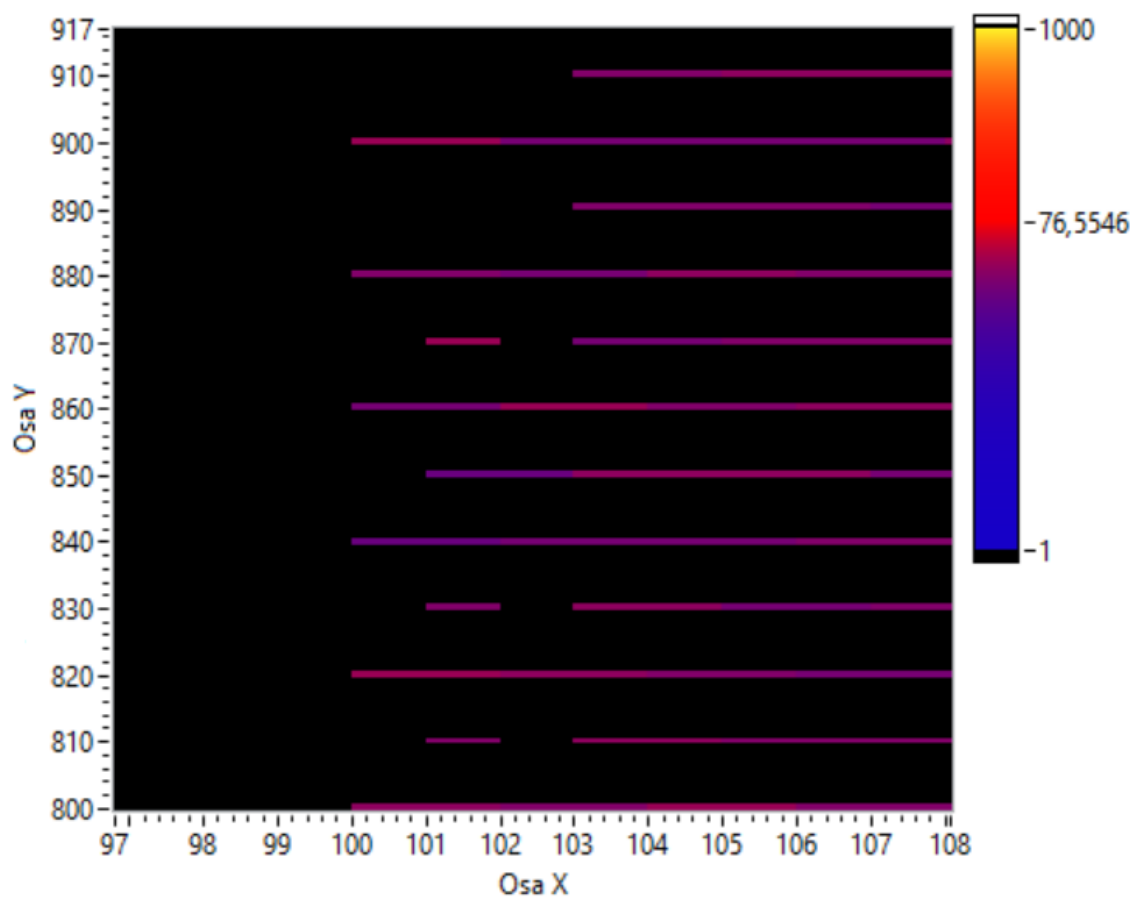
odstranění.

4.4.1 Generace pulsů

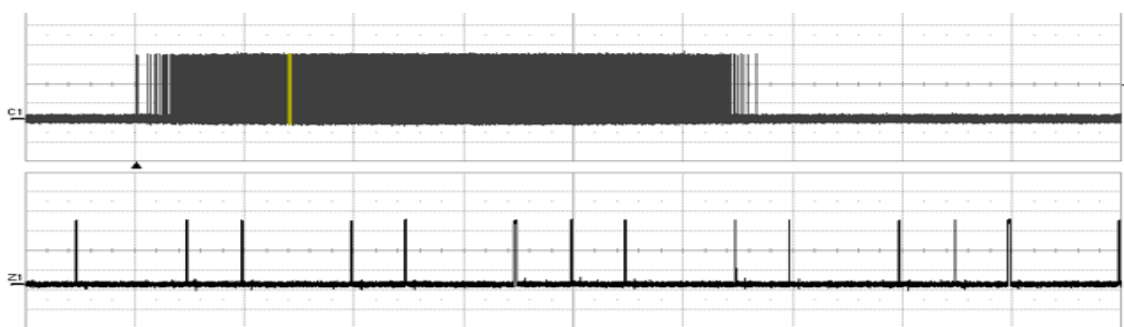
V kontroléru od společnosti Standa bylo možné nastavit generování pulsů při každém x -tém kroku motoru. Což je důležité z důvodu vzorkování dat, chceme pro každý krok získat hodnotu z fotodiody. Při nastavení $x = 1$, neboli při každém kroku docházelo při zrychlování k vynechávání pulsů, lze vidět na Obr. 4.20. Při zpracování dat z fotodiody lze na intenzitním grafu Obr. 4.19 vidět prázdná místa, kde došlo k vynechání pulsu. Po dosažení nastavené rychlosti již k tomuto jevu nedocházelo, viz Obr. 4.21. K odstranění tohoto problému došlo při nastavení $x = 2$, tedy generace pulsu jednou za dva kroky. Software mikrokontroléru, pomocí kterého se vzorkuje signál z fotodiody byl upraven tak, aby poslal při každém pulsu dvě stejné hodnoty. Tímto se sice sníží rozlišení ve výsledném grafu, ale graf bude ucelený. Jedná se o dočasné řešení než bude hotový nový kontrolér.

4.4.2 Obrácení pořadí

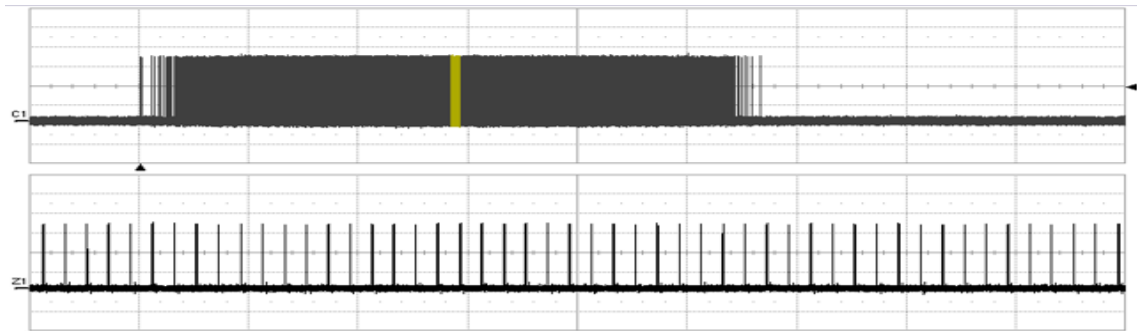
Dalším problémem bylo převrácení řádků naměřených dat. Docházelo k obrácení pořadí vypisování dat na sudých a lichých řádcích. Projevení tohoto problému v praxi je zachyceno na Obr. 4.22. Problém byl způsoben neimpedačním přizpůsobením vstupu A/D převodníku a fotodiody. K vyřešení došlo připojením operačního zesilovače ve funkci napěťového sledovače na vstup A/D převodníku.



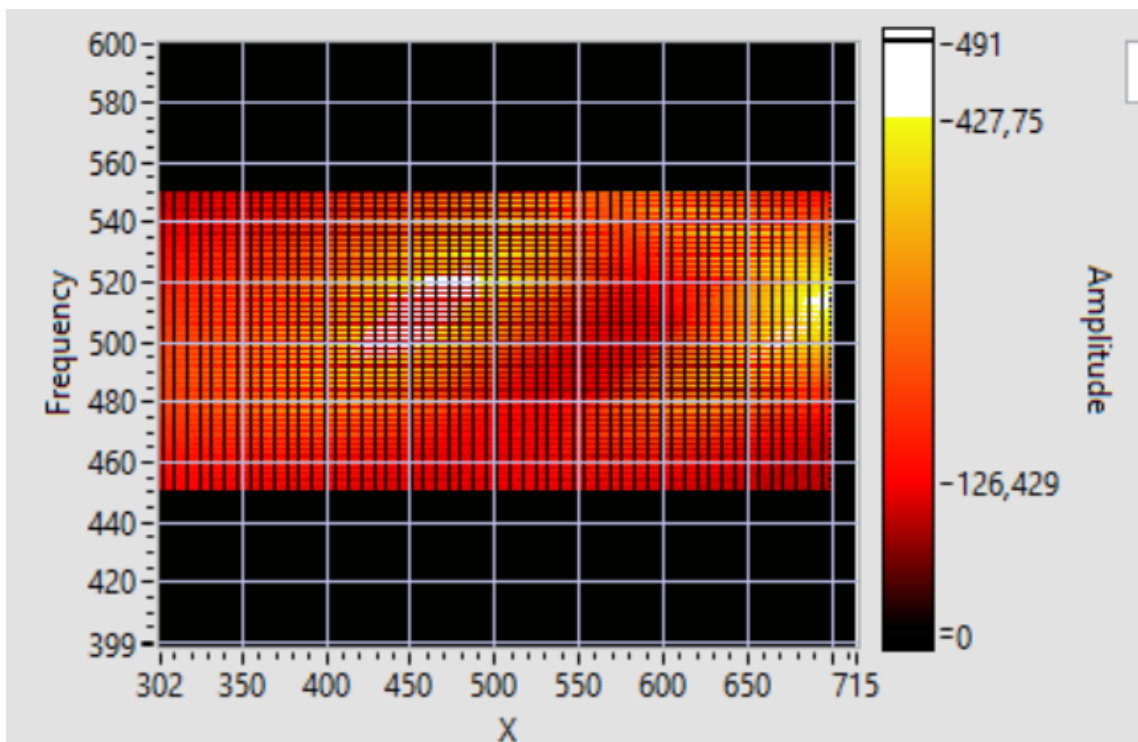
Obrázek 4.19: Vynechávání kroků z důvodu nedostatečné rychlosti generování pulsů, při testování algoritmu.



Obrázek 4.20: Vynechané impulsy během zrychlování krokových motorů, pozorováno pomocí osciloskopu Teledyne LeCroy SDA813Zi.



Obrázek 4.21: Standardní generace pulsů, při pohybu krokového motoru, pozorováno pomocí osciloskopu Teledyne LeCroy SDA813Zi.



Obrázek 4.22: Problém s otáčením směru výpisu hodnot na sudých a lichých řádcích při testování algoritmu.

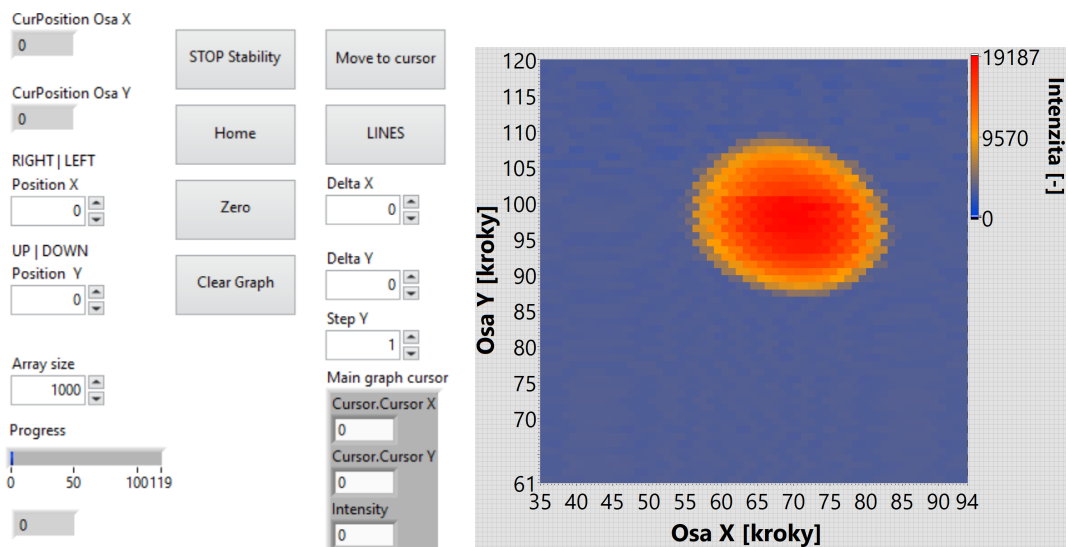
4.5 Ovládání grafického rozhraní

Jedním z bodů zadání mé bakalářské práce bylo vytvoření programového rozhraní v prostředí LabVIEW pro ovládání motorizovaného držáku zrcadla, ve kterém využívám algoritmus pro optimalizaci laserových rezonátorů. Programové rozhraní, které jsem vytvořil je uvedeno na Obr. 4.23a a nyní popíši princip jeho ovládání. Pokud se budeme pohybovat ze shora dolů, první co vidíme jsou indikátory *CurPosition Osa X* a *CurPosition Osa Y*, tyto indikátory nám poskytují informaci, kde se nachází krokové motory vzhledem k relativní poloze $[0,0]$. Pod nimi se nacházejí dva ovládací prvky a čtyři tlačítka. Ovládací prvky *Position X* a *Position Y* slouží k ovládání lineárního pohybu jednotlivých krokových motorů. Ze zmíněných tlačítek *HOME* přivede oba krokové motory na pozici 300 od absolutní nulové pozice motoru. Absolutní nulová pozice motoru je určena jedním z koncových spínačů lineárního posunu mechaniky kinematického držáku zrcadla. *ZERO* vynuluje současné pozice, nastavíme si tak relativní polohu $[0,0]$. *Clear Graph* vymaže graf viditelný na pravé straně, do tohoto grafu se vypisují hodnoty naměřené během pohybu krokového motoru. *STOP Stability* zastaví jakýkoliv probíhající pohyb. Níže se nachází *Array Size*, tento ovládací prvek určuje maximální velikost pole, které budeme zkoumat. Střed pole se nachází na relativní pozici $[0,0]$.

Nyní popíši tři ovládací prvky seřazené pod sebou na pravé straně, označené *Delta X*, *Delta Y* a *Step Y*. *Delta X* udává rozsah pohybu v kladném i záporném směru v ose *X*, *Delta Y* má stejnou funkci v ose *Y*. *Step Y* udává hrubost kroku, vydělením celkového rozsahu osy *Y* tímto krokem získáme počet opakování provedení kroků algoritmu - počet vodorovných úseček. Ke spuštění algoritmu se používá tlačítka *LINES*, ukazatel průběhu označený *Progress* ukazuje celkový počet kroků algoritmu a v jaké části provedení se nachází celkový algoritmus.

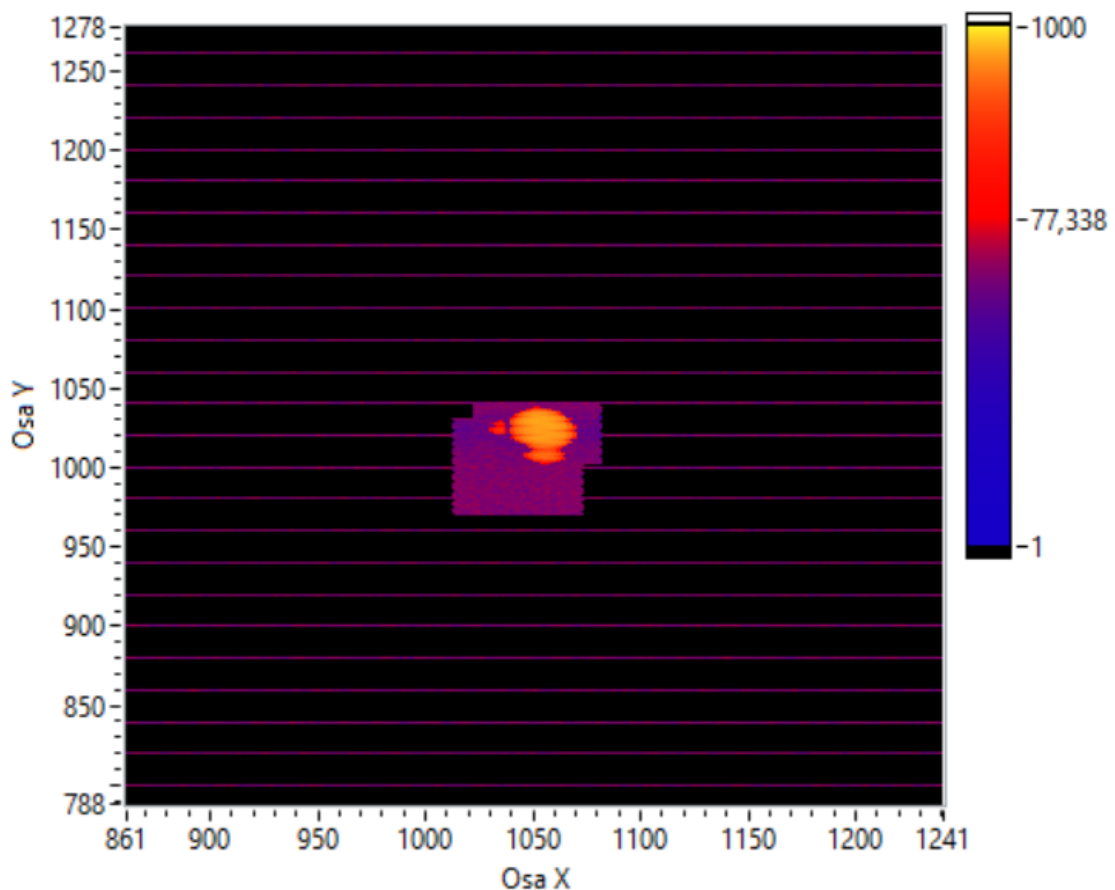
Poslední součástí vytvořeného rozhraní jsou kurzory, pomocí kterých můžeme nalézt požadovanou pozici na intenzitním grafu (ta se zobrazuje indikátory *Main graph cursor*) a následně dát motorům pokyn se na ní přesunout tlačítkem *Move to cursor*.

Nyní si popíšeme způsob ovládání grafického rozhraní při měření. Uživatel si ovládacími prvky *Position X* a *Position Y* nastaví střed oblasti, kterou chce prozkoumat. Pro tuto pozici si vytvoří relativní nulovou pozici tlačítkem *Zero* a pomocí tlačítek *Delta X* a *Delta Y* si nastaví rozsah pohybu v jednotlivých směrech a hrubost kroku pomocí *Step Y*. Po hrubém prozkoumání oblasti si pomocí kurzorů určí přesnější střed, oblast ve které došlo k naladění laseru a nastaví si jemnější krok. Dokud není s výsledkem spokojen, viz Obr. 4.24.



(a) Schéma ovládacích prvků v grafickém rozhraní. (b) Zachycení intenzity v závislosti na posunu jednotlivých os.

Obrázek 4.23: Grafické rozhraní vyvinuté pro algoritmus optimalizace laserových rezonátorů.



Obrázek 4.24: Ladění laserového rezonátoru nejprve pomocí hrubého prozkoumání oblasti a následného nastavení jemnějšího kroku.

Závěr

V rámci své bakalářské práce jsem se seznámil s principem funkce diodově buzeného pevnolátkového laseru. Pro poskytnutý krystal $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$ jsem změřil průběh závislosti transmise na vlnové délce (viz Obr. 4.2) a dále závislost vlnové délky výstupního záření budící laserové diody na teplotě (viz Obr. 2.2). Následně jsem postavil rezonátor typu V, který jsem optimalizoval pro dosažení nejvyššího výstupního výkonu pomocí výměny reflektivity výstupního zrcadla (viz Obr. 4.6). Dále jsem sestavil rezonátor typu Z a po zavedení polovodičového satureovatelného absorberu na zrcadle do tohoto systému jsem taktéž provedl jeho optimalizaci na nejvyšší výkon (viz Obr. 4.11).

V další části jsem se seznámil s vývojovým prostředím LabVIEW od společnosti National Instruments, ve kterém jsem vytvářel dílčí programy: program pro ovládání kontroléru krokových motorů vyvinutý na katedře a pro kontrolér od firmy Standa, dále program pro kamery WinCamD, multimetr Aim TTi 1908P, A/D převodník NI-USB-6212, A/D převodník na vývojové desce s dsPIC32MK, další program sloužil pro měření vlivu teploty na prostorovou stabilitu.

V LabVIEW jsem navrhl a realizoval programové vybavení pro ovládání kinematického držáku zrcadla s využitím algoritmů pro optimalizaci laserových rezonátorů na nejvyšší výstupní výkon. Vyvinuté programové vybavení, pomocí kterého došlo k naladění a optimalizaci laserového rezonátoru typu V, je uvedeno na Obr. 4.23.

Porovnal jsem několik typů algoritmů pro optimalizaci laserových rezonátorů a provedl jsem zhodnocení s ohledem na technické limitace kontrolérů, které prozatím byly k dispozici. Z těchto důvodů jsem zvolil algoritmus úseček a jak je vidět na Obr.4.18, pomocí zvolení hrubé hodnoty kroku pro prvotní prohledání pole a následně jemnějšího kroku pro oblast, která nás zajímá, dojde ke značné úspoře času.

V rámci svého budoucího výzkumného úkolu a diplomové práce se budu věnovat vývoji algoritmu pro optimalizaci komplexnějších typů laserových rezonátorů.

Literatura

- [1] BRECHER, C.; SCHMITT, R.; LOOSEN, P.; GUERRERO, V.; PYSCHNY, N. et al. Self-optimizing approach for automated laser resonator alignment. Online. Optics and Lasers in Engineering. 2012, roč. 50, č. 2, s. 287-292. ISSN 01438166. [cit. 2023-12-06]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2011.08.001>.
- [2] EINSTEIN, A. Zur Quantentheorie der Strahlung, 1917. Physika Zeitschrift, 18, 121-128. Dostupné z: https://www.informationphilosopher.com/solutions/scientists/einstein/1917_Radiation.pdf.
- [3] MAIMAN, T. H. Stimulated Optical Radiation in Ruby. Online. Nature. 1960, roč. 187, č. 4736, s. 493-494. ISSN 0028-0836. [cit. 2023-12-05]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/187493a0>.
- [4] KOECHNER, W.: *Solid-State Laser Engineering*, Springer Science+Business Media, 2006, ISBN 0-387-29338-8.
- [5] PASCHOTTA, R. YAG Lasers. RP Photonics [online]. [cit. 2024-04-01]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/yag_lasers.html.
- [6] PASCHOTTA, R. Vanadate Lasers. RP Photonics [online]. [cit. 2023-08-09]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/vanadate_lasers.html.
- [7] TOWNES, CH. H. Production of Coherent Radiation by Atoms and Molecules, 1965. Science, roč. 149, no. 3686, pp. 831-41. [cit. 2023-12-05]. Dostupné z: <http://www.jstor.org/stable/1716038>.
- [8] SOCHOR, V. Lasery a koherentní svazky. Praha: Academia, 1990. Cesta k vědě (Academia), ISBN 80-200-0354-1.
- [9] KOTIK, J. a M. C. NEWSTEIN. Theory of LASER Oscillations in Fabry-Perot Resonators. Journal of Applied Physics [online]. 1961, 1961-02-01, 32(2), 178-186 [cit. 2023-12-06]. ISSN 0021-8979. Dostupné z: [doi:10.1063/1.1735974](https://doi.org/10.1063/1.1735974).
- [10] Shimadzu UV-VIS-NIR Spectrophotometer UV-3600 Instruction Manual. Tokyo, Japonsko, 2005.
- [11] HR2000+ Spectrometer Installation and Operation Manual. OceanOptics [online]. [cit. 2023-09-08]. Dostupné z: <https://www.oceaninsight.com/globalassets/catalog-blocks-and-images/manuals--instruction-ocean-optics/spectrometer/hr2000-.pdf>.

- [12] PM10. COHERENT [online]. [cit. 2023-09-08]. Dostupné z:https://coherentinc.my.site.com/Coherent/1097901?cclcl=en_US.
- [13] Laser Measurement Instruments >10 GHz. COHERENT [online]. [cit. 2023-09-08]. Dostupné z: <https://www.coherent.com/resources/datasheet/power-and-energy-measurement/photodetectors-plus-10-ghz-ds.pdf>.
- [14] Photodiodes. Thorlabs [online]. [cit. 2023-09-08]. Dostupné z: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=285&pn=FDS1010.
- [15] SHANNON, C.E. Communication in the Presence of Noise. Proceedings of the IRE [online]. 1949, 37(1), 10-21 [cit. 2023-08-31]. ISSN 0096-8390. Dostupné z: doi:10.1109/JRPROC.1949.232969.
- [16] WinCamD-UCD23 – 2/3"CCD Beam Profiler System. DATARAY [online]. [cit. 2023-09-08]. Dostupné z: https://dataray.com/products/wincamd-ucd23-2-3-ccd-beam-profiler-system?_pos=2&_sid=ec57327b0&_ss=r.
- [17] National Instruments logo [online]. [cit. 2023-09-08] https://www.ni.com/content/dam/web/scene7/images/logo_2020_white.svg.
- [18] NI LABVIEW PROGRAMMING. GTS TEST SOLUTION [online]. [cit. 2023-09-08]. Dostupné z:<https://gts-online.net/en/engineering/ni-alliance-partner/labview-programming/>.
- [19] NI Tools Network. NI [online]. [cit. 2023-08-09]. Dostupné z: <https://www.ni.com/en/support/downloads/tools-network.html>.
- [20] CHUNOSOV, N.I., reZonator [software], ©2010, poslední aktualizace 3.5.2023, dostupné z: <http://rezonator.orion-project.org/>.
- [21] MEDIATÉKA ČVUT [online]. [cit. 2024-01-04]. Dostupné z: <https://media.cvut.cz/cs/foto/20230517-katedra-fyzikalni-elektroniky-fjfi>.
- [22] 8MBM24 - Motorized Mirror Mounts. Standa [online]. [cit. 2023-08-09]. Dostupné z:https://www.standa.lt/products/catalog/motorised_positioners?item=251.
- [23] Stepper motor driver – The complete explanation. PoLabs [online]. [cit. 2023-09-08]. Dostupné z: <https://blog.poscope.com/stepper-motor-driver/>.
- [24] 8SMC5 - Controllers. Standa [online]. [cit. 2023-08-17]. Dostupné z: https://www.standa.lt/products/catalog/motorised_positioners?item=525.

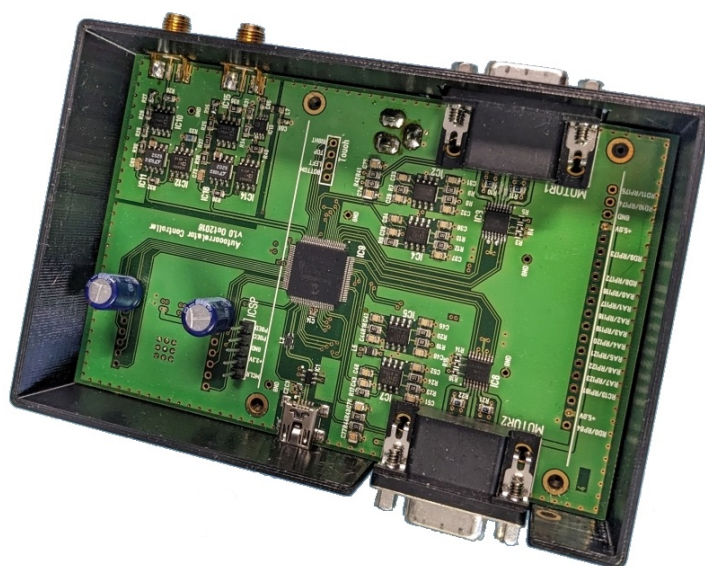
Příloha A

Kontrolér pro krokové motory vyvinutý na katedře

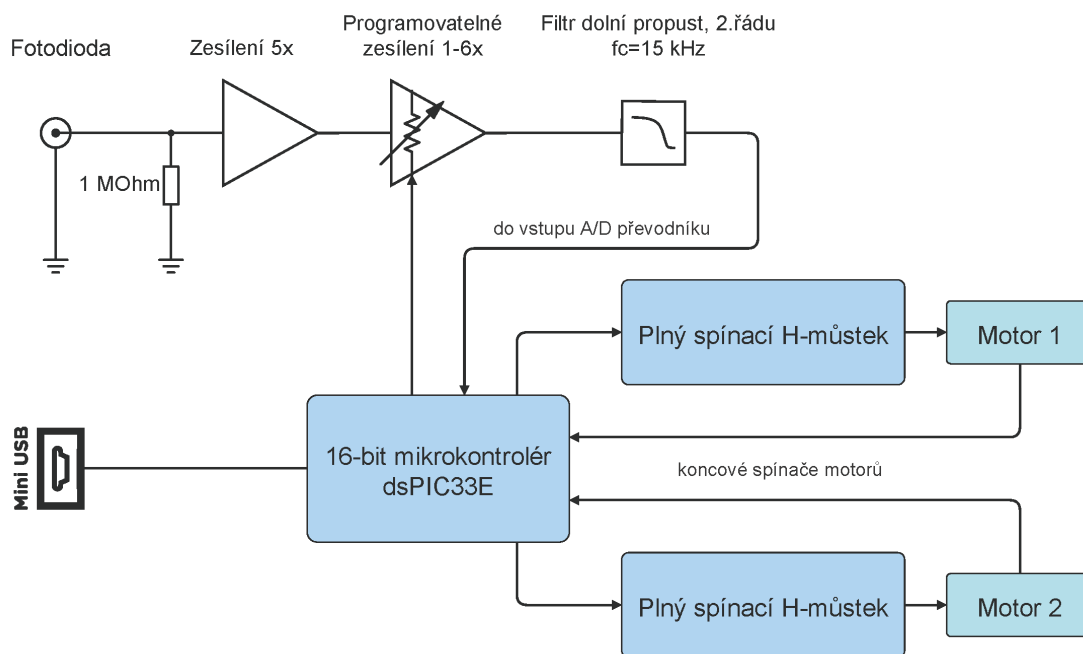
Tento kontrolér pro ovládání krokových motorů byl vyvinutý na katedře fyzikální elektroniky FJFI, viz Obr. 25. Technická specifikace tohoto zařízení je uvedena v Tab. 1. Jedná se o dvouosý kontrolér pro řízení dvou bipolárních krokových motorů pomocí rozhraní USB (Universal Serial Bus). Kontrolér je založený na 16-bitovém mikrokontroléru dsPIC33EP od společnosti Microchip a plném spínacím H-můstku DRV8848 od společnosti Texas Instruments. Blokové schéma je zobrazeno na Obr. 26. Algoritmus řízení krokových motorů obsahuje lichoběžníkový rozběhový profil s programovatelným zrychlením/zpomalením. Zařízení dále obsahuje programovatelný zesilovač signálu z fotodiody včetně filtru typu dolní propust. Výstup ze zesilovače je zapojený do modulu 12-bitového A/D převodníku uvnitř mikrokontroléru. Tímto je možné odečíst napětí na fotodiodě při každém kroku motoru.

Tabulka 1: Základní technické parametry kontroléru.

Maximální proud	1 A
Rozsah napětí	4 - 18 Vdc
Dělení kroků	1 (Full Step)
Maximální rychlost	10000 kroků/s
Programovatelnost	C, LabVIEW



Obrázek 25: Kontrolér pro krokové motory vyvinutý na katedře fyzikální elektroniky FJFI.



Obrázek 26: Blokový diagram kontroléru pro krokové motory vyvinutý na katedře fyzikální elektroniky FJFI.

Příloha B

Měření parametrů krokových motorů

Rychlost	Zrychlení	Počet přejezdů	Rozsah \pm	Poloha enkodéru	Zadrhnutí
2000	2000	5	1500	606	NE
1750	2000	5	1500	120	NE
1500	2000	5	1500	-4	NE
1600	2000	5	1500	2	NE
1700	2000	5	1500	0	NE
1800	2000	5	1500	0	NE
2000	2000	5	2200	0	NE
2500	2000	5	2200	0	NE
2500	4000	5	2200	0	NE
2500	5000	5	2200	0	NE
2500	6000	5	2200	0	NE
2500	7000	5	2200	0	NE
6700	12000	5	2900	1	NE
6800	12000	5	2900	1	NE
6900	12000	5	2900	N/A	ANO
6800	12000	10	2900	20	NE
6800	12000	20	3000	2	NE
6800	12000	100	3000	1	NE
6800	20000	100	3000	N/A	ANO

Tabulka 2: 600 mA

Rychlost	Zrychlení	Počet přejezdů	Rozsah \pm	Poloha enkodéru	Zadrhnutí
3000	8000	5	3000	0	NE
4000	8000	5	3000	1	NE
4500	8000	5	3000	1	NE
5000	8000	5	3000	1	NE
6000	10000	5	3000	0	NE
6500	10000	5	3000	N/A	ANO
6500	9000	5	3000	N/A	ANO
6000	11000	5	3000	N/A	ANO
6000	10000	5	3000	N/A	ANO
6000	8000	5	3000	24	NE

Tabulka 3: 500mA

Rychlost	Zrychlení	Počet přejezdů	Rozsah	Poloha enkodéru	Zadrhnutí
4000	8000	15	2000	0	ANO
1000	2000	4	2000	0	NE
2000	2000	4	2000	0	NE
2500	2000	4	2000	0	ANO
2250	2000	4	2000	0	NE
2400	2000	4	2000	0	NE
2400	2500	4	2000	0	ANO
2400	2250	4	2000	0	NE
2400	2150	4	2000	0	NE
2400	2050	4	2000	0	ANO
2000	2500	4	3000	0	ANO
2000	3000	4	3000	0	ANO
2000	4000	4	3000	0	ANO
2000	5000	4	3000	0	ANO
2000	6000	4	3000	0	ANO

Tabulka 4: 400 mA

Rychlost	Zrychlení	Počet přejezdů	Rozsah	Poloha enkodéru	Zadrhnutí
500	1000	4	1000	0	NE
1000	1000	4	1000	0	NE
1000	1500	4	1000	0	NE
1000	2000	4	1000	0	NE
1000	2500	4	1000	0	NE
1500	2500	4	1000	0	ANO
1000	3000	4	1000	0	NE
1000	4000	4	1000	0	NE
1000	5000	4	1000	0	NE
1000	10000	4	1000	0	NE
1200	2500	4	1000	0	ANO
1100	2500	4	1000	0	NE

Tabulka 5: 300 mA

rychlost	zrychlení	Počet prejezdu	Rozsah	Poloha enkodéru	Zadrhnutí
700	750	4	1600	0	ANO
500	750	4	2000	0	NE
600	750	4	1200	0	ANO
500	1000	4	700	0	ANO
400	1000	4	600	0	NE
400	1500	4	600	0	NE
400	2500	4	600	0	NE
500	800	4	900	0	ANO

Tabulka 6: 200mA