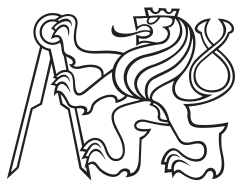


Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektromagnetického pole

Proměnný vláknový atenuátor

Štěpán Pavlík

Školitel: Ing. Jan Šístek, Ph.D.
Obor: Elektronika a komunikace
Srpen 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Pavlík** Jméno: **Štěpán** Osobní číslo: **487229**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektromagnetického pole**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Proměnný vláknový atenuátor

Název bakalářské práce anglicky:

Variable Optical Fiber Attenuator

Pokyny pro vypracování:

Seznamte se s funkčními principy vláknových atenuátorů, jejich parametry a oblastmi použití. S proměnným atenuátorem (komponentou) typu OZ Optics DD-100 určeným pro klasická jednovlákna zkonstruuje samostatně použitelný přístroj, který bude vybaven uživatelským rozhraním s mikrokontrolérem a jenž bude přes interface řídit samotný atenuátor. Nedílnou součástí je tvorba programového vybavení pro mikrokontrolér. V laboratoři ověřte správnou funkci přístroje.

Seznam doporučené literatury:

1. NOVOTNÝ, Karel. Optická komunikační technika. Praha: České vysoké učení technické, 1997.
2. SENIOR, John M. Optical fibre communications (third edition). Harlow: Prentice Hall, 2009.
3. HUI, Rongqing a Maurice S. O'SULLIVAN. Fiber optic measurement techniques. Burlington: Academic Press, 2009.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jan Šístek, Ph.D. katedra elektromagnetického pole FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **14.02.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **15.08.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **19.02.2024**

Ing. Jan Šístek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Děkuji panu Ing. Janu Šístkovi, Ph.D. za důkladné a trpělivé vedení mé bakalářské práce, ale také za vlídný a lidský přístup. Rovněž děkuji své celé rodině a přítelkyni za obrovskou psychickou a finanční podporu během mých studií na ČVUT.

Prohlášení

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

V Praze, 15. srpna 2022

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá kompletním návrhem a realizací jednovidového proměnného atenuátoru. Práce popisuje základní optické vlastnosti vláknových atenuátorů, jejich možné typy a jejich využití v praxi. Na teorii navazuje popis návrhu, realizace a ověření digitálně řízeného proměnného jednovidového atenuátoru, jehož jádrem je komponenta DD-100 od firmy OZ Optics. Chování atenuátoru je pro vlnovou délku 1550 nm ověřeno měření metodou vložných ztrát.

Klíčová slova: Optický atenuátor, Vložný útlum, DD-100

Školitel: Ing. Jan Šístek, Ph.D.

Abstract

The bachelor's thesis deals with the complete design and implementation of a single mode variable attenuator. The thesis describes the basic optical properties of fiber attenuators, their possible types and their use in practice. The theory is followed by a description of the design, implementation and verification of a digitally controlled variable single-mode attenuator, the core of which is the DD-100 component from OZ Optics. The behavior of the attenuator is verified for a wavelength of 1550 nm by measurement using the insertion loss method.

Keywords: Optical attenuator, Insertion loss, DD-100

Obsah

1 Úvod	1		
2 Optický atenuátor	2		
2.1 Obecný popis a možná rozdělení .	2		
2.2 Optické parametry atenuátorů...	4		
2.2.1 Vložný útlum.....	4		
2.2.2 Závislost na vlnové délce	4		
2.2.3 Druh optického vlákna	4		
2.2.4 Závislost na polarizaci	5		
2.2.5 Útlum odrazů	5		
2.3 Typické aplikace	5		
2.3.1 Zamezení přetížení optického přijímače	6		
2.3.2 Vyvážení optického výkonu v síti využívající WDM	6		
2.3.3 Měření na optických komunikačních systémech	7		
2.4 Využívané funkční principy optických atenuátorů	8		
2.4.1 Absorpční	8		
2.4.2 Útlum tvořen vzduchovou mezerou	8		
2.4.3 Útlum tvořený ohybem vlákna	10		
2.4.4 Reflektivní atenuátory využívající MEMS	11		
2.4.5 Útlumový článek tvořený clonkou	12		
2.4.6 Útlum využívající neutrálně hustotní variabilní filtr	12		
3 Realizace zařízení s optickým atenuátorem DD-100	14		
3.1 Realizace hardwarové části zařízení	16		
3.1.1 Vývojová deska s mikroprocesorem a napájecími obvody	19		
3.1.2 Řídící obvod krokového motoru	19		
3.1.3 Obvod optozávory	21		
3.1.4 Uživatelské rozhraní	22		
3.1.5 Úložiště potřebných dat	23		
3.1.6 Propojení všech modulů	23		
3.1.7 Externí napájecí zdroj	24		
3.2 Měření charakteristiky atenuátoru	25		
3.3 Návrh a realizace softwarové části	27		
3.3.1 Nastavení výchozí polohy motoru	30		
3.3.2 Uložená data na SD kartě	30		
3.3.3 Speciální znaky tisknuté na LCD displej	31		
4 Měření navrženého zařízení	32		
5 Závěr	34		
Literatura	35		
A Přílohy	38		
A.1 Rozměry a popis atenuátoru DD-100	38		
A.2 Certifikát atenuátoru DD-100	39		
A.3 Katalogový list krokového motoru Faulhaber AM1524	40		
A.4 Katalogový list převodovky Faulhaber 15/18	41		
A.5 Seznam elektronických příloh	42		

Obrázky

2.1	Možnosti připojení atenuátorů do systému	3	3.10	Schéma zapojení uživatelského ovládání	22
2.2	Příklad konstrukčního provedení variabilního a fixního atenuátoru	3	3.11	Schéma zapojení displeje	23
2.3	Síť WDM [15]	6	3.12	Schéma zapjení modulu pro SD kartu	23
2.4	Ilustrační výkonové spektrum v síti WDM	7	3.13	Vyrobená propojovací deska periferií s připojeným budičem motoru v pravém dolním rohu	24
2.5	Ilustrace převodní charakteristiky fotodetektoru	7	3.14	Uspořádání pro měření vložného útlumu a napětí optozávory v závislosti na krocích motoru	25
2.6	Uspořádání pro měření linearitu fotodetektoru [14]	8	3.15	Graf závislosti vložného útlumu a napětí optozávory na poloze motoru pro vlnovou délku 1550 nm	26
2.7	Atenuátor na principu absorpce [17]	8	3.16	Úvodní menu zařízení s označenými tlačítky	27
2.8	Atenuátor na principu axiální mezery [17]	9	3.17	Displej zařízení v režimu nastavení útlumu	28
2.9	Závislost velikosti vzduchové mezery na vložném útlumu [18]	9	3.18	Vývojový diagram hlavního programu	29
2.10	Atenuátor VOAMMF od firmy Thorlabs [19]	10	3.19	Proložení naměřených dat útlumu funkcí	30
2.11	Závislost ztrát na počtu otoček [20]	10	4.1	Scéma měření finálního výrobku	32
2.12	Atenuátor tvořený ohybem vlákna [21]	11	4.2	Závislost změřeného útlumu na nastaveném pro vlnovou délku 1550 nm	33
2.13	Reflektivní atenuátory	11			
2.14	Princip variabilního atenuátoru s nepropustnou clonkou [24]	12			
2.15	Variabilní atenuátor s nepropustnou clonkou [25]	12			
2.16	Princip variabilního atenuátoru s neutrálně hustotním filtrem [24]	13			
2.17	Variabilní atenuátor využívající neutrálně hustotní filtr [27]	13			
3.1	Atenuátor DD-100	14			
3.2	Blokové schéma navrhovaného zařízení	16			
3.3	Fotka předního panelu výrobku	18			
3.4	Fotka výrobku s odklopeným předním panelem	18			
3.5	Vývojový kit Arduino Mega 2560	19			
3.6	Budič krokového motoru AM1524	20			
3.7	Schéma propojení budiče s deskou Arduino a krokovým motorem	20			
3.8	Schéma optozávory	21			
3.9	Schéma navržené desky pro optozávoru	21			

Tabulky

3.1 Katalogové údaje variabilního atenuátoru DD-100 [28]	15
3.2 Tabulka příkazů pro pomocný firmware	26

Seznam použitých symbolů a zkratk

Symbol/Zkratka	Význam
C	Kapacita
FWM (<i>Four Wave Mixing</i>)	Čtyřvlnné směšování
I	Proud
IL	Vložný útlum
L	Útlum
λ	Vlnová délka
LD (<i>Laser Diode</i>)	Laserová dioda
LED (<i>Light Emitting Diode</i>)	Luminiscenční dioda
MM (<i>Multimode</i>)	Vícevidový mód
N	Počet bitů
P	Výkon
PDL	Ztráty polarizační závislosti
PWM (<i>Pulse Width Modulation</i>)	Pulzně šířková modulace
R	Odpor
RL	Ztráty odrazem
SM (<i>Single Mode</i>)	Jednovidový mód
SPI (<i>Serial Peripheral Interface</i>)	Sériové periferní rozhraní
SPM (<i>Self Phase Modulation</i>)	Vlastní fázová modulace
U	Napětí
WDM (<i>Wavelength Division Multiplexing</i>)	Vlnový multiplex
XPM (<i>Cross Phase Modulation</i>)	Křížová fázová modulace



Kapitola 1

Úvod

V optické komunikační technice, stejně jako v elektrických obvodech, je zapotřebí udržet výkonovou úroveň signálu v určitých mezích. Někdy bývá i nutné dosáhnout konkrétní hodnoty. Toho lze docílit vícero možnostmi. Například nastavením určité výkonové úrovně přímo na optickém zdroji, kde se využívá LD případně LED. Obvykle má ale vysílač jednu pevně danou výkonovou úroveň nebo je rozsah regulace velmi omezený, u LD typicky do 10 dB. V případě širšího rozsahu regulace se potom dá výhodně využít optického atenuátoru.

Cílem této práce je navrhnout samostatně funkční proměnný vláknový atenuátor s přívětivým uživatelským ovládním, který by mohl být využíván hlavně při měření v optických laboratořích. Hlavním modulem atenuátoru je zde DD-100 od výrobce OZ Optics. Práce spočívá v návržení a vyrobení potřebného hardwaru a zároveň v naprogramování příslušného řídicího mikrokontroléru.

Práce je rozdělena do tří základních částí. V první části jsou popsány základní optické vlastnosti atenuátorů, jejich využití a možná praktická provedení. Druhá část se zabývá praktickým návrhem zařízení jak z pohledu hardwarové, tak i softwarové části a je zde provedeno také první měření samostatného DD-100. Následující a poslední část se věnuje praktickému otestování výrobku a vyhodnocení naměřených výsledků.

Kapitola 2

Optický atenuátor

2.1 Obecný popis a možná rozdělení

Vláknový optický atenuátor je pasivní prvek využívaný v optické komunikační soustavě, který zajišťuje požadovaný a definovaný útlum výkonu přenášeného optického signálu [1]. Výkonový útlum je možné vytvořit i jinými způsoby, například pomocí odbočnice nebo úmyslnou vzduchovou mezerou v konektoru. Řešení je ale mnohdy zbytečně komplikované anebo velikost útlumu není definovatelná.

Optické atenuátory se z hlediska nastavitelnosti požadovaného útlumu dělí na dva základní typy.

- **Fixní optické atenuátory**

Jsou vyrobeny na pevně danou úroveň vložného útlumu a nelze je více konfigurovat. Jejich hlavní výhodou je malý rozměr a nízká pořizovací cena. Například výrobce Thorlabs nabízí fixní atenuátory s vložným útlumem 3 dB, 5 dB a dále po 5 dB do 25 dB [2].

- **Variabilní optické atenuátory**

U tohoto typu lze vložný útlum nastavit v daném rozsahu určeném výrobcem. Změna útlumu může být plynule nastavitelná, nebo v diskrétních krocích. Ovládání je mechanické, například otočným šroubkem, nebo elektrické, například se zabudovaným krokovým motorem. Za cenu variability jsou atenuátory objemnější a cenově dražší.

Optické atenuátory se dále mohou dělit dle použitého typu optického vlákna.

- **Jednovidové**

Atenuátory jsou určeny k použití v jednovidových optických systémech. Mohou být určeny pro jednu vlnovou délku (plus úzké pásmo okolo), nebo pro více pásem.

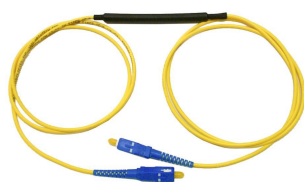
- **Vícevidové**

Atenuátory jsou určeny k použití ve vícevidových optických systémech. U těchto atenuátorů je důležité, aby se způsobovaný útlum projevoval pro všechny přenášené vidy stejně.

■ Zachovávající polarizaci

Jedná se o speciální typ atenuátorů, určený pro jednovidové systémy s polarizovaným signálem, u kterých je zapotřebí zachovat danou vstupní polarizaci.

Optickým atenuátorům lze přisoudit další možná rozlišovací kritéria. Například dělení z hlediska možností připojení do systému, a to na typ in-line, nebo konektorový typ. Typ In-line, vyobrazený na obrázku 2.1a, je zabudován do propojovacích kabelů zakončených konektory. Konektorový typ je pro ukázkou zobrazen na obrázku 2.1b. Tento konkrétní typ je ve formě přechodu konektorů ST/UPC z typu zástrčka na typ zásuvka.



(a) : typ In-line [5]



(b) : typ konektor [4]

Obrázek 2.1: Možnosti připojení atenuátorů do systému

Další z mnoha možností je rozlišovat optické atenuátory z hlediska použitelnosti v určité šířce pásma vlnových délek. Rozlišují se na úzkopásmové a širokopásmové. Úzkopásmové jsou majoritně určeny pouze pro jednu vlnovou délku, jejich rozsah může být například $1550 \text{ nm} \pm 50 \text{ nm}$. Širokopásmové mají kontinuální rozsah přes více používaných vlnových délek, například 1290 až 1600 nm. Další možných typů dělení je mnoho, ale v bakalářské práci se jimi nebudu zabývat.



(a) : Variabilní atenuátor od výrobce Ultipulse [5]



(b) : Fixní atenuátor od výrobce FS [6]

Obrázek 2.2: Příklad konstrukčního provedení variabilního a fixního atenuátoru

Na obrázku 2.2 jsou vyobrazeny příklady konstrukčního provedení variabilního a fixního jednovidového atenuátoru. Variabilní atenuátor od firmy Ultipulse, který je ovládán elektronicky s příslušným uživatelským rozhraním a disponuje rozsahem útlumu od 0 do 30 dB. Fixní atenuátor je od výrobce FS, který tento typ nabízí s hodnotou 1 až 25 dB.

2.2 Optické parametry atenuátorů

Ideální atenuátor by měl mít přesný a stabilní útlum bez závislosti na vlnové délce, typu polarizace, teplotě a neměl by způsobovat odrazy nebo interferenci optického signálu [7]. Dále by měl být stabilní při mechanické manipulaci. Je tedy nutné definovat parametry, které určují vlastnosti atenuátoru.

2.2.1 Vložný útlum

Nejdůležitějším udávaným parametrem je vložný útlum označovaný IL (*Insertion Loss*). Je to útlum signálu způsobený vloženým atenuátorem, často je uváděn včetně optických konektorů. U fixních atenuátorů udávaná hodnota specifikuje jejich pevný útlum, zatímco u variabilních atenuátorů jednotka označuje minimální možný útlum a následně je specifikován maximální rozsah. Vložný útlum je vždy udáván k odpovídající vlnové délce a je konkretizován určitou přesností. Uvádí se v úrovněvé jednotce decibel a spočítá se podle [1] jako

$$IL = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_1}{P_2} \right) = P_{\text{dBm}_1} - P_{\text{dBm}_2} \text{ [dB, W, W, dBm, dBm]}, \quad (2.1)$$

kde P_1 označuje vstupní optický výkon přivedený do atenuátoru, P_2 je výstupní optický výkon vystupující z atenuátoru a P_{dBm_1} , P_{dBm_2} označují jejich příslušné výkonové úrovně v jednotce dBm.

2.2.2 Závislost na vlnové délce

V optické komunikační soustavě se nejčastěji využívají vlnové délky 850, 1310 a 1550 nm. Většina optických atenuátorů je tedy určena pro provoz na těchto vlnových délkách.

Jednovidové atenuátory mohou být určeny pro provoz pouze v jedné vlnové délce, nebo pokrývají určitý rozsah vlnových délek. Například fixní atenuátor typu FA25T-APC od firmy Thorlabs pokrývá vlnové délky od 1240 až do 1620 nm [2]. Opakem je fixní atenuátor typu FOATSC-55-10D od výrobce L-com, který je určen pouze pro vlnovou délku 1550 nm [8].

Vícevidové atenuátory by neměly být na vlnové délce závislé. Příkladem vícevidového atenuátoru s minimální závislostí na vlnové délce je typ FA02M od výrobce Thorlabs, který ve svém katalogovém listu viz [9], uvádí výkonovou nezávislost na vlnové délce.

2.2.3 Druh optického vlákna

Každý optický atenuátor je přesně určený typem použitého optického vlákna, se kterým je kompatibilní. Pracovní režimy optických vláken se rozlišují na jednovidové a vícevidové [1]. Často se uvádí také typy atenuátorů pro speciální jednovidová vlákna udržující vstupní polarizaci.

2.2.4 Závislost na polarizaci

Z důvodu nedefinovaných polarizačních stavů v optických vláknech je důležité, aby byl útlum optického attenuátoru polarizačně nezávislý. V katalogových listech se uvádí jako veličina označená PDL v jednotce dB. Hodnota vyjadřuje výkonovou ztrátu závislou na polarizaci a spočítá se podle [10] jako

$$PDL = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_{\max}}{P_{\min}} \right) [\text{dB}, W, W], \quad (2.2)$$

kde je v poměru maximální P_{\max} a minimální P_{\min} výkon vzhledem ke všem polarizačním stavům.

2.2.5 Útlum odrazů

Při průchodu světelného signálu optickou komponentou se většina signálu šíří požadovaným směrem, ale část signálu se odrazí nebo rozptyluje. U optických attenuátorů to je způsobeno hlavně reflektancí, neboli odrazivostí. Reflektance vzniká při průchodu signálu do oblasti s rozdílným indexem lomu a je závislá na úhlu dopadu, polarizaci a indexech lomu prostředí. Útlum odrazů tedy určuje útlum odražené vlny, proto je velmi žádoucí vysoká hodnota, aby odrazy neovlivňovaly přenosové vlastnosti cesty. Útlum odrazů se vypočítá podle [11] jako

$$RL = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_s}{P_{\text{refl}}} \right) [\text{dB}, W, W], \quad (2.3)$$

kde P_s je dopadající výkon a P_{refl} je celkový odražený výkon do vysílače.

Pro představu je uveden výpočet RL na rozhraní sklo-vzduch. Index lomu vzduchu odpovídá $n_1 = 1,00$ a průměrného křemenného skla $n_2 \sim 1,50$. Dále je vypočítán činitel odrazu jako

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right) = -0,20. \quad (2.4)$$

Z kvadrátu činitele odrazu je následně určen celkový útlum odrazů jako

$$RL = -10 \cdot \log_{10} (|R|^2) = 14,00 \text{ dB}. \quad (2.5)$$

Z výpočtů je patrné, že na rozhraní sklo-vzduch se odrazí 4 % výkonu, čemuž odpovídá $RL = 14,0$ dB. To je považováno za vysoký odraz. Opakem mohou být například šikmo broušené konektory, které mívají RL vyšší než 50 dB.

2.3 Typické aplikace

V praxi se nejčastěji využívají fixní attenuátory s potřebným útlumem, které řeší okamžitou potřebu, proto jsou také jedním ze základních stavebních prvků optických sítí. Největší důraz je kladen na minimalizaci rozměrů a ceny.

Variabilní attenuátory jsou nejvíce využívány při testování optických systémů v laboratořích. Jejich variabilita je důvodem vyšší pořizovací ceny.

2.3.1 Zamezení přetížení optického přijímače

Každý optický přijímač má definovaný maximální a minimální vstupní optický výkon. V důsledku překročení maximálního optického výkonu může dojít k saturaci přijímače, čímž se detekovaný signál stane nečitelným a vzroste chybovost. Při příliš vysokém výkonu může dojít i k poškození přijímače.

Jednoduchou praktickou ukázkou může být zapojení s optickým vysílačem 10GBASE-ZRC SFP+ od výrobce FS a optickým přijímačem R2862A od výrobce Agere Systems. Dle [12] je vysílač schopen vysílat optický signál s výkonovou úrovní 5 dBm. Přijímač by dle doporučení katalogového listu [13] měl přijímat optický signál s minimální výkonovou úrovní -19 dBm a maximální 0 dBm. Úroveň vysílače tedy převyšuje maximální přípustnou úroveň přijímače o 5 dBm. V případě přímého propojení smyčkou loopback by bylo nutné zařazení attenuátoru o velikosti alespoň 5 dB.

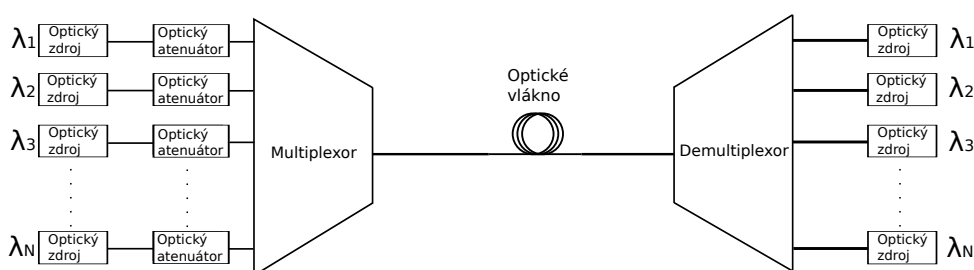
2.3.2 Vyvážení optického výkonu v síti využívající WDM

V komunikačních sítích se často využívá technologie WDM (*Wavelength Division Multiplexing*), kde je více optických kanálů s různou vlnovou délkou sjednoceno do jednoho optického vlákna. Uvnitř vlákna následkem nelineárních jevů může docházet k mezi kanálovým přeslechům, které mohou způsobit nečitelnosti na výstupu demultiplexoru. Hlavními zdroji přeslechů je vlastní fázová modulace SPM (*Self Phase Modulation*), křížová fázová modulace XPM (*Cross Phase Modulation*) a čtyřvlnné směšování FWM (*Four-wave Mixing*) [14]. Všechny zmíněné jevy vychází z Kerrova jevu, který popisuje změnu indexu lomu prostředí úměrnou intenzitě procházejícího světla.

K SPM dochází změnou intenzity procházejícího kanálu, následkem které se mění vlastní fáze a tím se rozšiřuje celkové spektrum kanálu [14].

XPM popisuje jev, kdy modulace intenzity jednoho optického kanálu fázově moduluje jiný společně šířený optický kanál ve stejném vlákne [14].

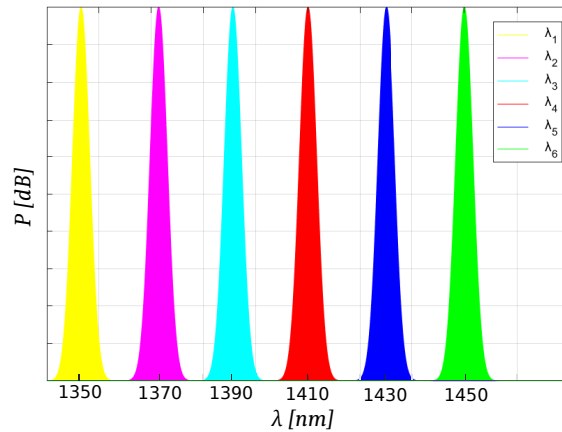
U čtyřvlnného směšování FWM dochází vzájemnou interakcí mezi třemi optickými kanály ke generování nové spektrální složky s rozdílnou frekvencí [14].



Obrázek 2.3: Síť WDM [15]

Aby výsledné vzájemné ovlivňování přeslechy bylo pro všechny optické kanály podobné, je nutné srovnat vstupující signály do multiplexoru na stejnou výkonovou úroveň. Jako příklad může posloužit zapojení podle [15],

kteřé je vyobrazeno na obrázku 2.3. Hodnota připojených atenuátorů musí být taková, aby každý signál vstupující do multiplexoru disponoval stejnou výkonovou úrovní. Pro ilustraci je uvedeno ideální WDM spektrum, které je na obrázku 2.4.

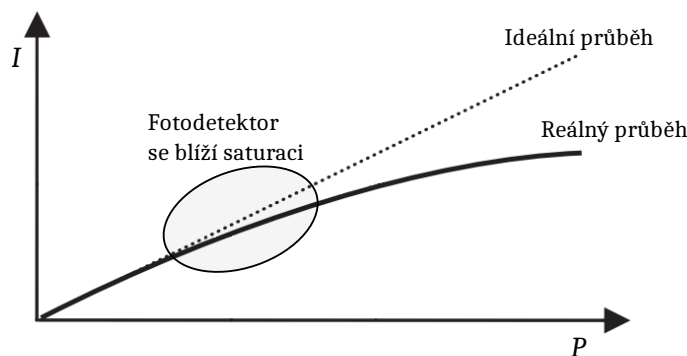


Obrázek 2.4: Ilustrační výkonové spektrum v síti WDM

2.3.3 Měření na optických komunikačních systémech

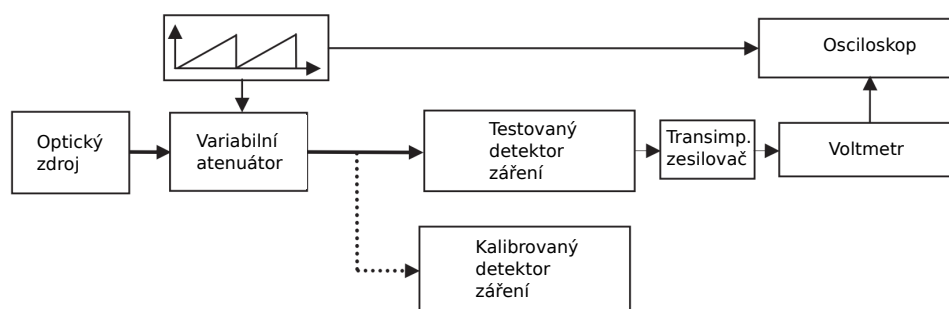
Další využití, které se týká hlavně variabilních atenuátorů, je při vlastním měření optických systémů a jejich testování.

Příkladem může být měření citlivosti a linearity optického detektoru. Každý fotodetektor či celý optický přijímač má omezený dynamický rozsah. Při určitém překročení vstupního optického výkonu dojde k saturaci fotodetektoru, kterou vystihuje ilustrační obrázek 2.5.



Obrázek 2.5: Ilustrace převodní charakteristiky fotodetektoru

Uvedenou charakteristiku je možné nejnáze změřit s výkonově rozmítaným optickým zdrojem, jak ukazuje uspořádání na obrázku 2.6, dle [14]. Výkonové rozmítání je realizováno pomocí proměnného atenuátoru, který mění výkonovou úroveň dopadajícího signálu na referenční a kalibrovaný přijímač. Na osciloskopu je následně zobrazována odezva referenčního detektoru.



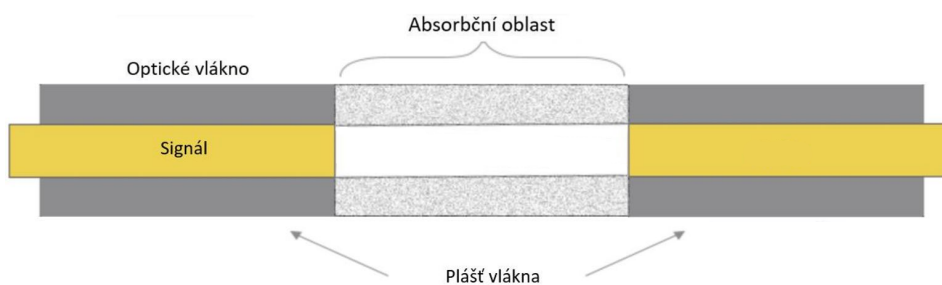
Obrázek 2.6: Uspořádání pro měření linearity fotodetektoru [14]

2.4 Využívané funkční principy optických atenuátorů

Útlum lze ve vláknu vytvořit více fyzikálními mechanismy, z nichž jen některé mají praktický význam pro konstrukci atenuátorů. Výčet využívaných principů nemůže být vždy kompletní, protože způsobů tvoření útlumu je mnoho a někteří výrobci to dokonce považují za své know-how.

2.4.1 Absorpční

Tyto útlumové články jsou tvořeny absorpční oblastí, která je pro ilustraci na obrázku 2.7. Oblast bývá tvořena úmyslným přidáním různých nečistot, kterými mohou být například Cr^{3+} , C^{2+} , Cu^{2+} , Fe^{2+} [16]. Absorpční oblast následkem interakce signálu s přidáním materiálem vyzáří část signálu v podobě tepla.

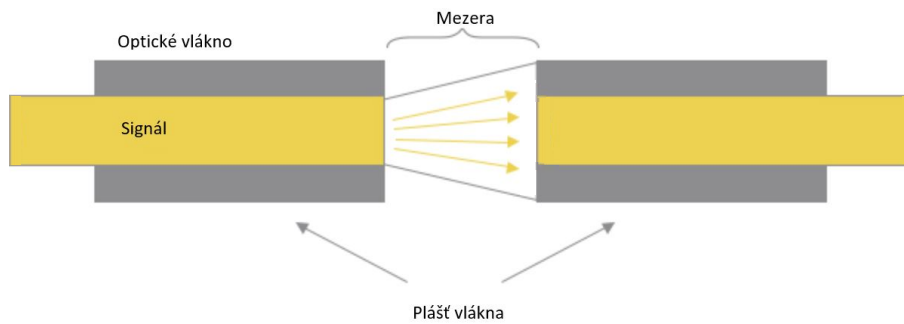


Obrázek 2.7: Atenuátor na principu absorpce [17]

Absorpční atenuátory jsou vhodné především pro systémy s nízkým vyzařovacím optickým výkonem a vysokou citlivostí na polarizaci signálu.

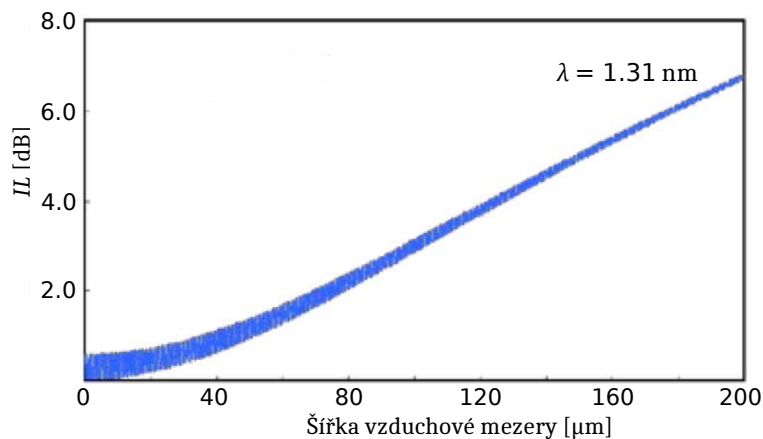
2.4.2 Útlum tvořen vzduchovou mezerou

U těchto atenuátorů vzniká útlum na vzduchové mezeře, jejíž šířku lze měnit mechanicky, většinou nekalibrovaně. Tento princip je ilustrován na obrázku 2.8.



Obrázek 2.8: Atenuátor na principu axiální mezery [17]

Analýzu chování vlákna se vzduchovou mezerou uvádí článek [18]. Jsou rozlišovány dvě šířky mezery, a to jednak šířka srovnatelná s vlnovou délkou (tehdy dochází k opakovaným odrazům jako ve Fabry-Perotovu rezonátoru), jednak mnohem širší než vlnová délka (převažuje vyzařování mimo jádro). Graf na obrázku 2.9 demonstruje závislost vložného útlumu na velikosti vzduchové mezery, pro klasické jednovidové vlákno G.652 s nulovou disperzí a pro vlnovou délku $1,31 \mu\text{m}$.



Obrázek 2.9: Závislost velikosti vzduchové mezery na vložném útlumu [18]

Nevýhodou těchto atenuátorů je jednak závislost na vlnové délce, ale také odrazy od konců vláken určené Fresnelovými rovnicemi. Naopak výhodou je jednoduchá konstrukce.

Příkladem takového atenuátoru je typ označován jako VOAMMF od firmy Thorlabs, který je zobrazen na obrázku 2.10. U tohoto typu lze vložný útlum regulovat pomocí dvou prstencových matek, přičemž pomocí první je nastavena potřebná velikost vzduchové mezery a pomocí druhé je mezera fixována.



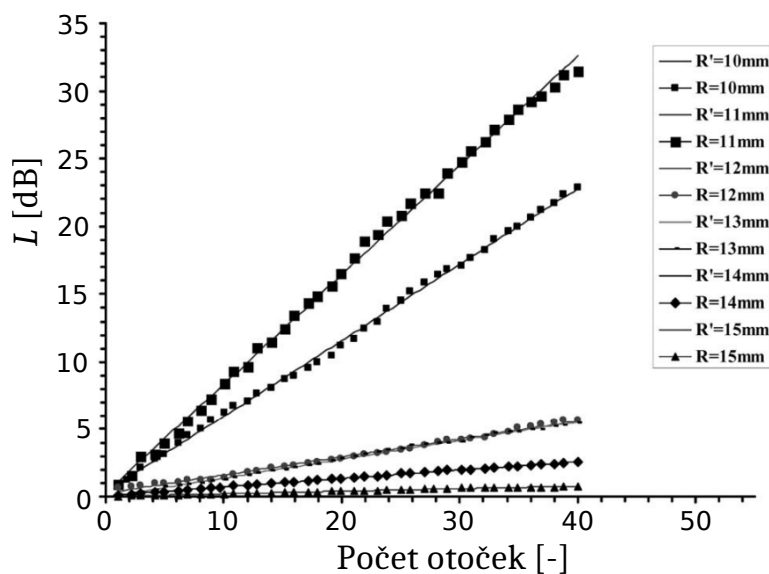
Obrázek 2.10: Atenuátor VOAMMF od firmy Thorlabs [19]

2.4.3 Útlum tvořený ohybem vlákna

Tento typ atenuátorů je založen na principu ztráty ohybem, při kterém dochází k vyzaření části signálu do vláknového pláště.

Rozeznáváme dva druhy ohybu, a to mikroohyb (mikroskopické odchylky podél osy vlákna) a makroohyb (ohyb mnohem větší než poloměr vlákna) [20]. Pro tvorbu atenuátorů se využívají makroohyby.

Analýza ztrát způsobených makroohyby vlákna je popsána v článku [20], ve kterém je útlum ohybem pro jednovláknové vlákno G.652 a vlnovou délkou $1550\ \mu\text{m}$ také změřen. Převzatý graf z naměřených a vypočtených dat je na obrázku 2.11 a demonstruje závislost ztrát na počtu otoček pro různé poloměry ohybu R .



Obrázek 2.11: Závislost ztrát na počtu otoček [20]

Atenuátory jsou tvořeny pouze plastovým pouzdem jako je vidět na obrázku 2.12, skrze který může být veden optický kabel s jedním nebo více závitů. Krabíčka je kompatibilní s různými průměry optických kabelů.

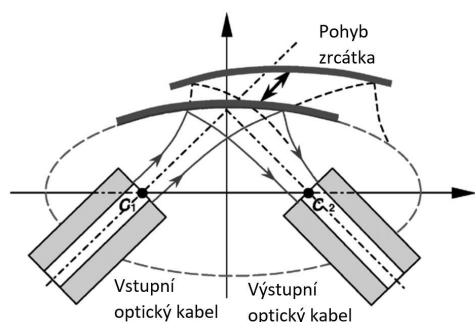
Použitelnost atenuátoru je omezena, neboť nastavený útlum vykazuje závislost na vlnové délce a typu využitého optického vlákna. Další nevýhodou může být rozměrnější konstrukce plastové krabičky. Naopak výhodou je jednoduchost a absence nutnosti rozpojení optické trasy při aplikaci.



Obrázek 2.12: Atenuátor tvořený ohybem vlákna [21]

2.4.4 Reflektivní atenuátory využívající MEMS

Zkratka MEMS (*Micro Electro Mechanical Systems*) označuje mikromechanickou strukturu křemíkového čipu, která je velice kompaktní, má vysokou životnost, nízkou spotřebu elektrické energie a rychlou odezvu. Často využívaný princip reflektivních atenuátorů se strukturou MEMS je vyobrazen na obrázku 2.13(a). Tento typ je tvořen dvěma eliptickými zrcátky. První zrcátko zajišťuje plné nasměrování dopadajícího signálu do druhého zrcátka, díky čemuž není potřeba kolimačních čoček. Druhé zrcátko zajišťuje potřebný odklon signálu od výstupního optického kabelu a jeho pohyb je pomocí struktury MEMS ovládán napětím [22].



(a) : Princip reflektivního atenuátoru [22]



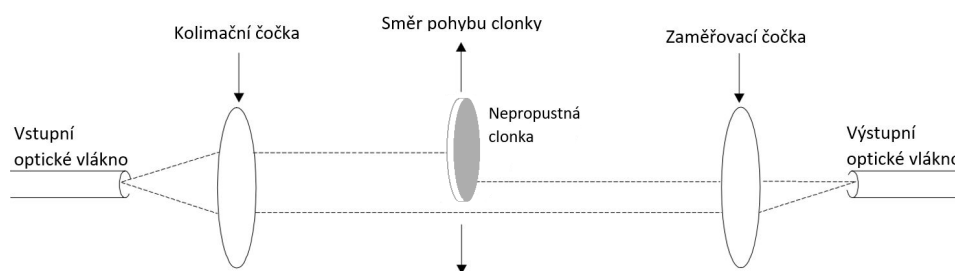
(b) : Reflektivní atenuátor využívající technologie MEMS [23]

Obrázek 2.13: Reflektivní atenuátory

Finální produkt od firmy Lucent Technology je vidět na obrázku 2.13(b). Velkou výhodou těchto atenuátorů jsou kompaktní rozměry, prakticky nulový budicí výkon a velká životnost.

2.4.5 Útlumový člunek tvořený clonkou

Princip tohoto typu je zobrazen na obrázku 2.14. Pomocí kolimační čočky je potlačena rozbíhavost paprsku vyzařujícího ze vstupního vlákna. Do kolimovaného paprsku o šířce v řádech stovek μm je vsunuta nepropustná clonka, která blokuje část svazku, čímž vzniká požadovaný útlum. Následně je paprsek fokusační čočkou fokusován do výstupního vlákna.



Obrázek 2.14: Princip variabilního atenuátoru s nepropustnou clonkou [24]

Tímto atenuátorem je například typ VOA780PM-FC od firmy Thorlabs zobrazený na obrázku 2.15, u kterého je clonka ovládána mechanicky pomocí šroubku.



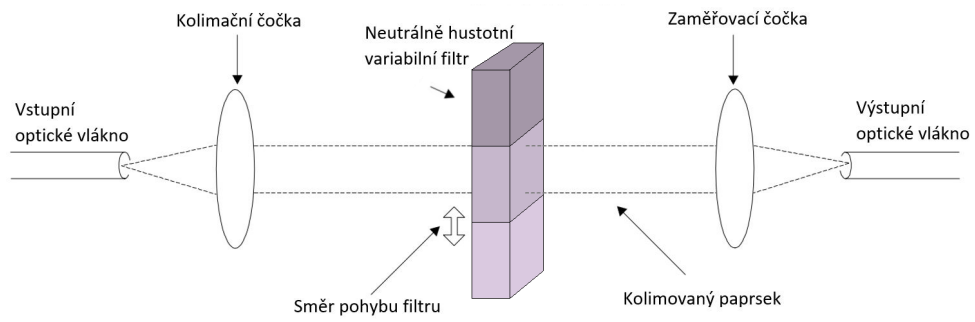
Obrázek 2.15: Variabilní atenuátor s nepropustnou clonkou [25]

Tento princip nabízí velký dynamický rozsah a je využíván hlavně pro SM aplikace z důvodu větší odchylky útlumu pro různé vlny.

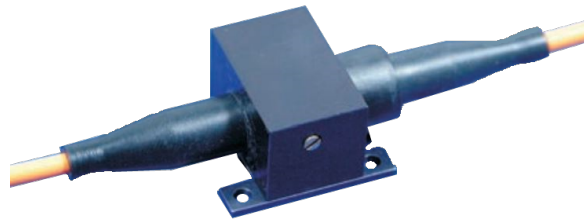
2.4.6 Útlum využívající neutrálně hustotní variabilní filtr

Tento typ také využívá kolimační optiky, ale do cesty svazku je postaven kotouč, na němž je buď spojitý, nebo stupňovitě proměnný neutrální filtr. Filtr může být tvořen například sklem dopovaným určitým materiálem, který zajišťuje potřebný útlum pomocí absorpce nebo reflektance. Filtr má v různých částech rozdílné vlastnosti, díky kterým lze pohybem filtru do určité oblasti nastavit požadovaný útlum [26]. Princip je zobrazen na obrázku 2.16, kde jsou popsány veškeré části.

Tento typ je určen hlavně pro MM aplikace díky konstantnímu útlumu pro různé vlny. Příkladem může být atenuátor od firmy OZ Optics s označením BB-500-11, který je vidět na obrázku 2.17. Potřebný útlum je nastaven postranním šroubkem.



Obrázek 2.16: Princip variabilního attenuátoru s neutrálně hustotním filtrem [24]

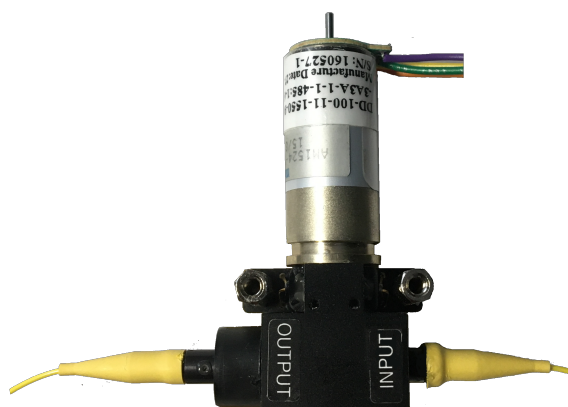


Obrázek 2.17: Variabilní attenuátor využívající neutrálně hustotní filtr [27]

Kapitola 3

Realizace zařízení s optickým atenuátorem DD-100

Po uvedení základních teoretických vlastností atenuátorů se vraťme k zadání práce. Jádrem této práce je návrh samostatně fungujícího proměnného vláknového atenuátoru. Ten je vytvořen na základě atenuátoru (komponenty) od OZ Optics, který byl před lety zakoupen na katedru a nevyužíván. Jde o typ s jednovláknovým vláknem a typovým označením DD-100-11-1550-9/125-S-60-3A3A-1-1-485:1-6-PC. Komponenta atenuátoru je zachycena na obrázku 3.1, technický výkres obsahující rozměry se nachází v příloze A.1.



Obrázek 3.1: Atenuátor DD-100

Základní optické parametry z katalogového listu [28] jsou specifikovány v tabulce 3.1. Výrobce k zakoupenému zařízení dodal také certifikát, naskenovaný v příloze A.2, deklarující atestaci vložného útlumu v závislosti na počtu kroků motoru pro vlnovou délku 1550 nm.

Atenuátor je založen na principu blokace svazku clonkou, jak je popsáno v sekci 2.4.5, se vstupním a výstupním jednovláknovým vláknem o tloušťce 900 mikronů ukončeným úhlovým konektorem typu FC/PC. Clonka se otáčí na hřídeli, který je poháněn z převodovaným krokovým motorem AM1524 od firmy Faulhaber, převodovkou od stejného výrobce s označením 15/8. Zpětnou vazbu o poloze clonky signalizuje optozávora HOA1877 od firmy Honeywell.

Ovládání zařízení funguje tak, že buzením dvou vinutí krokového motoru se clonka atenuátoru otáčí cyklicky přes celý útlumový rozsah. Z tohoto důvodu je do komponenty přidána optozávora, díky níž lze najít potřebnou referenční polohu motoru. Navržené zařízení proto musí disponovat budičem krokového motoru, AD převodníkem pro vyhodnocování optozávory a uživatelským rozhraním, které slouží k zadávání požadovaného útlumu. Z výše zmíněných požadavků je patrné, že zařízení bude nutné vybavit také programovatelným řídicím mikrokontrolérem, jehož použití je nezbytné i z hlediska zadání práce. V následujících sekcích této kapitoly je popsán návrh a realizace samostatně fungujícího zařízení z hardwarového a softwarového hlediska.

Tabulka 3.1: Katalogové údaje variabilního atenuátoru DD-100 [28]

Typ optického kabelu		SM
Dostupné vlnové délky		350 - 2050 nm
Rozsah útlumu		IL do 60 dB
Minimální vložný útlum ² (IL)	Typicky	1.0 dB
	Maximálně	2.0 dB
Minimální rozlišitelnost vložného útlumu ¹		0.01 dB
Závislost vlnové délky na útlumu ³	od 1300 nm do 1550 nm	do 0.3 dB
	od 1520 nm do 1570 nm	do ± 0.1 dB
Závislost na polarizaci ²	Typicky	do 0.05 dB
	Minimálně	do 0.01 dB
Útlum odrazů ^{2,4}		40, 50 nebo 60 dB
Opakovatelnost nastavení vložného útlumu	do 10 dB	± 0.03 dB
	do 30 dB	± 0.10 dB
Přesnost	do 40 dB	± 0.3 dB
	40 do 55 dB	± 0.5 dB
	55 do 60 dB	± 1 dB
Maximální optický výkon		do 2 W

Poznámky k tabulce 3.1:

¹ Pro útlum do 10 dB.

² Včetně optických konektorů.

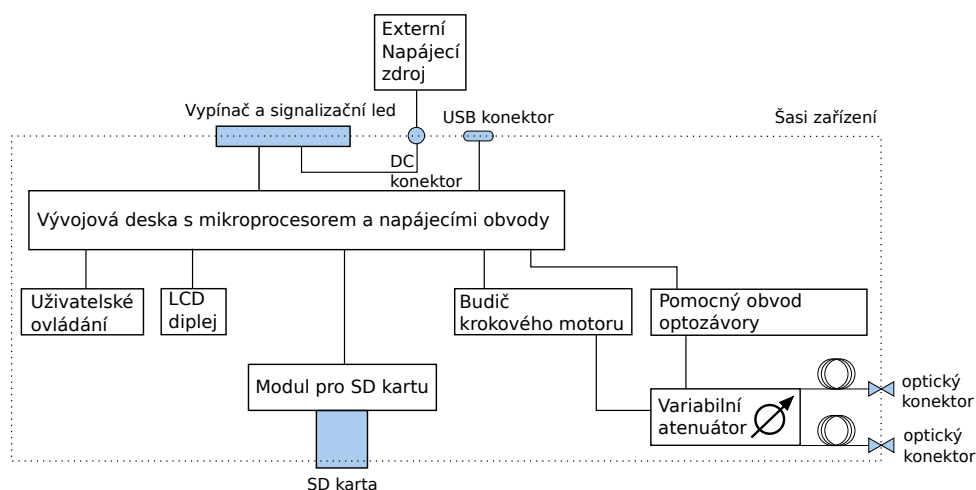
³ Měřeno při minimální teplotě 23°C a při minimálním vložném útlumu.

⁴ Útlum odrazů dosahuje 60 dB pouze pro vlnové délky 1290 až 1625 nm.

3.1 Realizace hardwarové části zařízení

Základním cílem je fyzicky vytvořit zařízení, které za pomoci tlačítek, enkodéru a LCD displeje umožní uživateli nastavit požadovaný útlum. Dříve jsem se na katedře setkal s atenuátorem DA-100 od výrobce OZ Optics s kompletním rozhraním vytvořeným výrobcem. Tento typ disponoval nemotorným ovládním tlačítky, díky čemuž mě inspiroval k vytvoření uživatelsky přívětivějšího ovládní.

Potřebný hardware zařízení se skládá z několika bloků, kterými jsou: optický atenuátor, vývojová deska s mikroprocesorem, driver krokového motoru, pomocný obvod optozávory, modul pro SD kartu, uživatelské ovládní, LCD displej a napájecí zdroj. Blokové schéma navrhovaného zařízení je vidět na obrázku 3.2.



Obrázek 3.2: Blokové schéma navrhovaného zařízení

Řídicím jádrem celého zařízení je mikrokontrolér umístěný na vývojové desce. Pro data reprezentující závislost útlumu na počtu kroků motoru je paměť rozšířena o SD kartu, která je připojena pomocí hotového modulu. O analogové ovládní krokového motoru a optozávory se stará budič a pomocný obvod. Uživatelský výstup je tvořen LCD displejem a vstup obstarává uživatelské ovládní tvořené enkodérem a třemi tlačítky. Celé zařízení je napájeno externím napěťovým zdrojem, který je stabilizován a dále rozveden za pomoci napájecích obvodů na vývojové desce mikroprocesoru. Všechny části, výjimkou externího zdroje, jsou s vyvedenými konektory, SD kartou a vypínačem umístěny v šasi.

Realizované zařízení umístěné v šasi (*Scame SCABOX 686.207*) s rozměry 190x140x70 mm je vidět na obrázcích 3.3 a 3.4, kde 3.3 vyobrazuje přední panel a 3.4 zachycuje celý vnitřek. Výrobek je určen pro použití v optických laboratořích, z tohoto důvodu je konstruován modulárním způsobem, díky čemuž jsou případné hardwarové změny jednoduše realizovatelné. Program je možné nahrát přes USB port za pomoci sériového rozhraní. Optický vstup a výstup jsou označeny příslušnými popisky *INPUT* a *OUTPUT* a připojují

se konektory typu FC/PC. Pro napájení 7 až 12 V je určena DC zásuvka s rozměry 5,5x2,1 mm. Výrobek je také opatřen vypínačem a červenou signalizační diodou.

Jako vývojovou desku jsem zvolil Arduino MEGA, která je osazena AVR mikroprocesorem ATmega2560 a pracuje na frekvenci 16 MHz. Deska se také stará o stabilizaci napětí na 5V, které je získáno externím zdrojem přivedeným na DC zásuvku. Podrobnější informace o výběru a vlastnostech vývojové desky jsou rozebrány v sekci 3.1.1, nutné parametry externího napájecího zdroje jsou dále specifikovány v sekci 3.1.7.

Pro připojení periférií procesoru a jejich napájení byla vytvořena deska plošného spoje s konektory typu XH a roztečí 2,54 mm. Propojovací deska je připojena pomocí kolíkových lišt přímo na vývojovou desku Arduino. Návrh propojovací desky je podrobně popsán v sekci 3.1.6. Na desku s konektory je na přímo, pomocí kolíkových lišt, připojen řídicí obvod krokového motoru A4988 od výrobce Allegro MicroSystems, jeho volba a parametry jsou definovány v sekci 3.1.2.

Deska pro optozávoru je umístěna přímo na atenuátoru a slouží také k propojení krokového motoru s Arduinem. Optozávora je připojena k obvodu desky za pomoci SIP patice. Vyrobená deska je popsána v sekci 3.1.3.

Uživatelské ovládání je tvořeno enkodérem s tlačítkem a dalšími čtyřmi tlačítky. Zobrazení informací obstarává LCD displej 128x64. Navržená deska uživatelského ovládání a LCD displej jsou uchyceny na předním panelu zařízení a popsány v sekci 3.1.4.

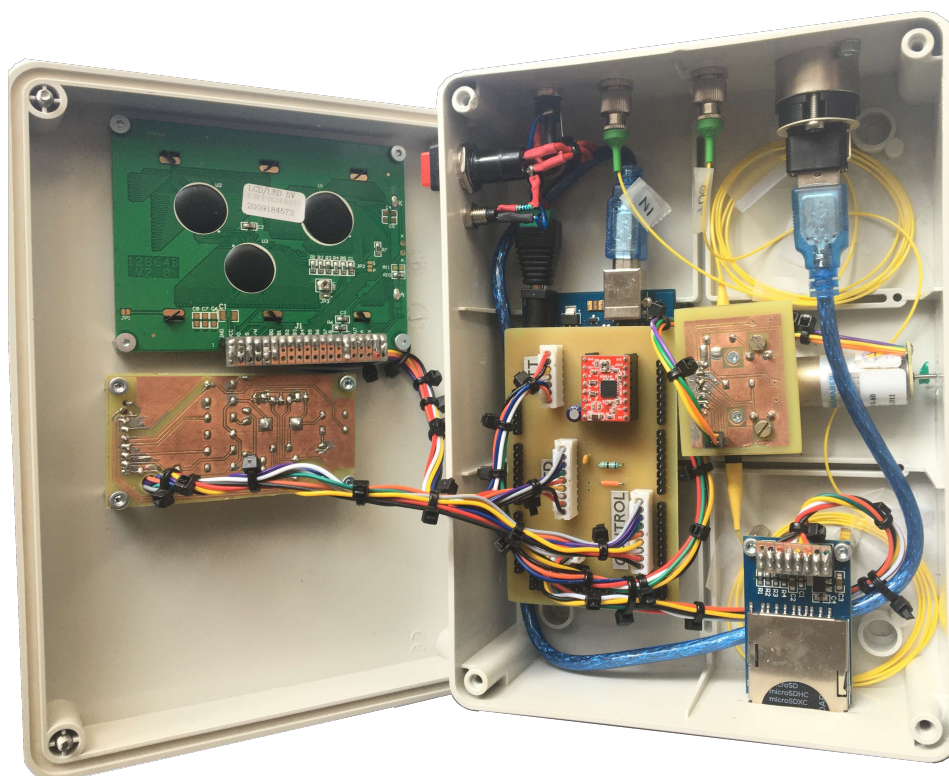
Modul pro SD kartu je umístěn na spodní straně zařízení. SD karta je zasouvána z vnější strany šasi, kde otvor označuje popis *SD card*. Modul SD karty je blíže popsán v sekci 3.1.5.

Všechny navržené plošné spoje byly vyrobeny fotocestou, kde osvit fotocitlivé vrstvy prováděly dvě 12 W UV lampy a vývojku představoval roztok NaOH. Vyrobené desky byly ručně vyvrtány, osazeny a otestovány. Odpovídající schémata zapojení, footprinty a seznamy materiálů jsou umístěny v elektronické příloze, jak ukazuje příloha A.5.

3. Realizace zařízení s optickým attenuátorem DD-100



Obrázek 3.3: Fotka předního panelu výrobku



Obrázek 3.4: Fotka výrobku s odklopeným předním panelem

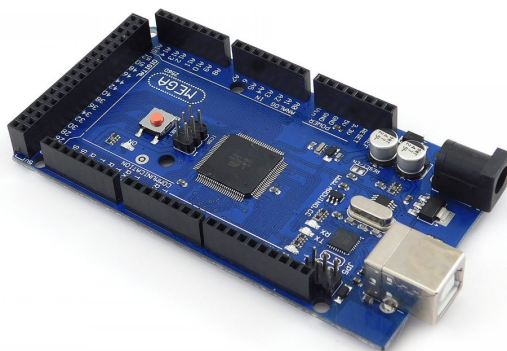
■ 3.1.1 Vývojová deska s mikroprocesorem a napájecími obvody

Mé požadavky pro výběr vývojové desky s mikroprocesorem byly:

- Vybavenost SPI komunikačním obvodem
- Minimálně 21 vstupních/výstupních pinů (kde jsou alespoň 2 PWM regulátory a 1 AD převodník)
- Programovatelnost pomocí USB portu počítače
- Dostatečná velikost paměti flash a SRAM
- Provozní napětí 5V

Při výběru jsem se rozhodl procesor lehce předimenzovat, aby případné budoucí úpravy zařízení nebyly problémem.

Mou volbou se stala vývojová deska Arduino MEGA s mikroprocesorem ATmega2560, k vidění na obrázku 3.5.



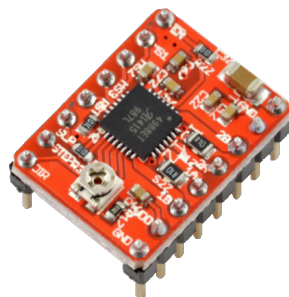
Obrázek 3.5: Vývojový kit Arduino Mega 2560

Podle katalogového listu [29] AVR procesor poskytuje 54 vstupních/výstupních, 14 PWM a 16 ADC pinů, které jsou na desce vyvedeny pomocí dutinkových lišt s roztečí 2,54 mm. Dále podporuje SPI komunikaci a maximální velikost programu může být 256 kB bez započítání nahraného bootloaderu. Deska je vybavena USB-SERIAL převodníkem, díky němuž lze mikrokontrolér programovat přes USB konektor počítače. Vstupní napětí desky by mělo být 7 až 12 V. Maximální proud, který je možné z desky odebrat, je 800 mA při provozním napětí 5 V.

■ 3.1.2 Řídící obvod krokového motoru

Před samostatným návrhem řídicího obvodu je nutné specifikovat parametry konkrétního typu motoru. Jedná se o dvoufázový krokový motor s označením AM1524 od firmy Faulhaber. Motor je dále zpřevodován poměrem 76:1 pomocí převodovky řady 15/8 od stejného výrobce. Katalogový list ke krokovému motoru a převodovce je přiložen v příloze A.3 a A.4.

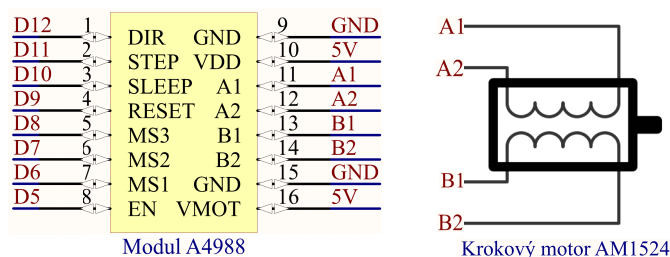
Dvoufázový krokový motor je možné řídit bipolárně pomocí dvou H-můstek, kde přiváděný napájecí zdroj na vinutí cívek může být proudový, nebo napěťový. V mém případě jsem zvolil napájení vinutí konstantním napětím o velikosti 5 V. Důvodem je jeho jednoduchost a dostatečná rychlost při velice nízkém kroutícím momentu, který je pro posuv optické clonky postačující. Rychlost otáčení bude tedy omezena spíše rychlostí přepínání H-můstek.



Obrázek 3.6: Budič krokového motoru AM1524

Jako řídicí obvod s dvěma H-můstkami jsem vybral hotový modul obsahující integrovaný obvod A4988 od výrobce Allegro MicroSystems s příslušnými součástkami napájenými na společné desce. Fotka modulu je na obrázku 3.6. H-můstky zakomponované v integrovaném obvodu jsou tvořeny DMOS tranzistory, které je možné digitálně ovládat 5V napěťovými úrovněmi s maximální rychlostí přepínání 500 μ s.

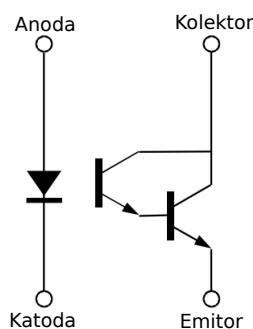
Digitální ovládání obvodu A4988 je umožněno pomocí 8 pinů, které jsou označeny jako: DIR, STEP, SLEEP, RESET, MS3, MS2, MS1, EN. Pinem DIR je ovládán směr otáčení motoru, STEP slouží ke krokování motoru, SLEEP umožňuje stand by mód, RESET zprostředkovává nastavení výchozí polohy, MS1 až MS3 nastavuje velikost kroku motoru od 1/16 až po celý krok, EN slouží jako spínač napájení H-můstek. K napájení H-můstek byl dle katalogového listu [30] přidán blokovací kondenzátor o velikosti 47 μ F. Na obrázku 3.7 je vidět propojení příslušných pinů s deskou Arduino a motorem, kde D_{12} až D_5 označuje digitální výstupy mikrokontroléru.



Obrázek 3.7: Schéma propojení budiče s deskou Arduino a krokovým motorem

3.1.3 Obvod optozávory

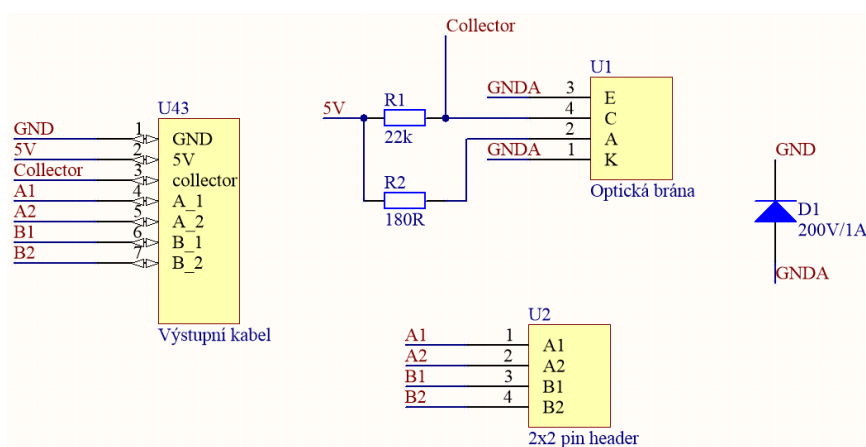
Optozávora HOA1877 od firmy Honeywell je tvořena LED diodou a Darlingtonovým fototranzistorem. Mezi LED a Darlingtonovým fototranzistorem je umístěna hřídelka převodovky krokového motoru. Ta blokuje, při určitém natočení propouští, dopadající záření na fototranzistor. Zařízení disponuje čtyřmi výstupními svorkami, schéma senzoru s označenými piny je na obrázku 3.8.



Obrázek 3.8: Schéma optozávory

LED a fototranzistor jsou napájeny z vývojové desky Arduino. Při odebíraném napětí 5 V je nutné před anodu LED a před kolektorem fototranzistoru umístit předřadné odpory. Pro protékající proud diodou 20 mA a napětí na diodě 1,4 V byl vypočten odpor 180 Ω . Odpor před kolektorem byl zvolen na 22 k Ω . Při otevření fototranzistoru bude tedy emitorem protékat proud 227 μA + proud bázi podle dopadajícího optického záření. Napětí na kolektoru fototranzistoru bude snímán pomocí 10 bitového AD převodníku mikrokontroléru ATmega2560.

Optický sensor je pevně přichycen k celému zařízení atenuátoru, jak ukazuje technický výkres v příloze A.1. Pro jeho připojení byla zhotovena deska plošného spoje, která se uchytí přímo na atenuátor pomocí distančních sloupků. Schéma desky je na obrázku 3.9.

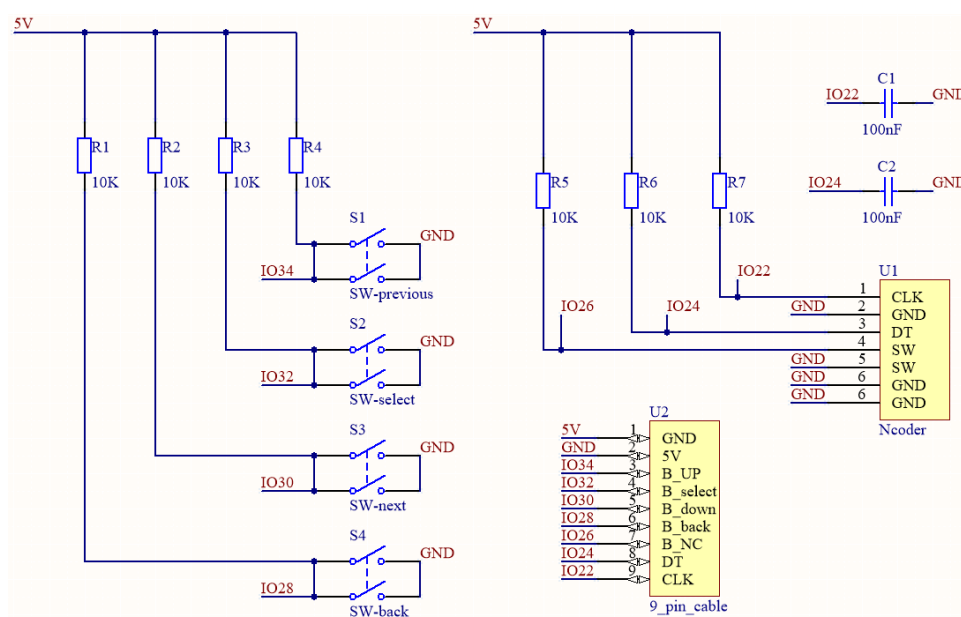


Obrázek 3.9: Schéma navržené desky pro optozávoru

Na desku byl přidán 2x2 pin header s roztečí 1 mm pro připojení krokového motoru. Přidána byla také dioda na maximální napětí 200 V a maximální proud 1 A, která chrání optický senzor před prepólováním přivedeného napájení. Výstup z desky je tvořen 7 vodiči zakončenými konektorem typu XH s roztečí 2,54 mm.

3.1.4 Uživatelské rozhraní

Pro uživatelské ovládání byl zvolen inkrementální enkodér s tlačítkem a čtyři další tlačítka. Snímaný signál z tlačítek a datových pinů enkodéru je připojen přes pull-up rezistory o velikosti 10 k Ω . Pull-up rezistory slouží k omezení proudu procházejícím tlačítky a ncodérem v případě shoení napětových úrovní na logickou nulu. K datovým výstupům enkodéru jsou připojeny blokovací kondenzátory o velikosti 100 nF. Pro tlačítka a ncodér jsem navrhl a vytvořil desku. Navržené schéma jejího zapojení je na obrázku 3.10. Výstup z desky je opět tvořen pomocí devítizilového kablíků zakončeného konektorem XH s roztečí 2,54 mm. Katalogové listy zvolených tlačítek a enkodéru jsou dostupné na webových stránkách [31] a [32].

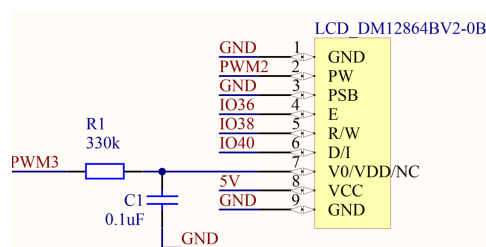


Obrázek 3.10: Schéma zapojení uživatelského ovládání

Pro uživatelský výstup byl zvolen monochromatický LCD displej s počtem bodů 128x64 a označením DM12864BV2-0B. Jedná se kompletní desku s příslušným řídicím obvodem ST7920 od výrobce Sitronix, který umožňuje komunikaci pomocí protokolu SPI s maximální rychlostí 540 baud. Propojení pinů LCD displeje s Arduino deskou ukazuje obrázek 3.11.

Displej je konfigurován pomocí SPI protokolu pouze třemi datovými piny IO36, IO38, IO40. Jas a kontrast displeje jsou řízeny pulzně šířkovou modulací, u které je střední hodnota získána RC filtrem s mezní frekvencí 4,82 Hz. Pro ovládání jasu filtr nebyl připojen z důvodu vysoké hodnoty odporu,

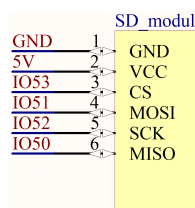
který příliš omezuje proud nutný pro osvit displeje. Regulace podsvícení byla bez filtru ozkoušena a nebylo vyzorováno žádné blikání. Displej je napájen 5 V přivedenými z desky Arduino.



Obrázek 3.11: Schéma zapojení displeje

3.1.5 Úložiště potřebných dat

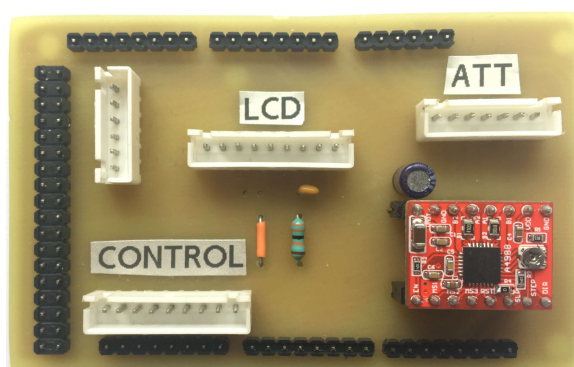
Paměť mikrokontroléru je rozšířena SD kartou, která slouží k uložení dat reprezentujících závislost útlumu na počtu kroků motoru. Rozšíření bylo realizováno s hotovým modulem čtečky SD karet. Čtení a zápis dat na kartu se provádí pomocí SPI sběrnice a podporovaný formát SD karty je FAT16, nebo FAT32. Pro SD kartu bylo využito vestavěných SPI periférií mikrokontroléru, které podporují maximální hodinovou frekvenci 4 MHz. Propojení pinů mikrokontroléru a SD modulu je na obrázku 3.12.



Obrázek 3.12: Schéma zapojení modulu pro SD kartu

3.1.6 Propojení všech modulů

Za účelem chtěné modularity jsem vytvořil desku plošného spoje obsahující konektory typu XH s roztečí 2,54 mm. Ta slouží pro propojení periférií mikroprocesoru popsanych v sekcích 3.1.2 až 3.1.5. S úmyslem šetření místa v šasi jsem na plošný spoj umístil také řídicí obvod krokového motoru. Deska je připojena pomocí kolíkových lišt přímo na vývojovou desku Arduino. Zhotovená deska je vyfocena na obrázku 3.13. Konektor bez popisku je určen pro připojení SD modulu.



Obrázek 3.13: Vyrobená propojovací deska periférií s připojeným budičem motoru v pravém dolním rohu

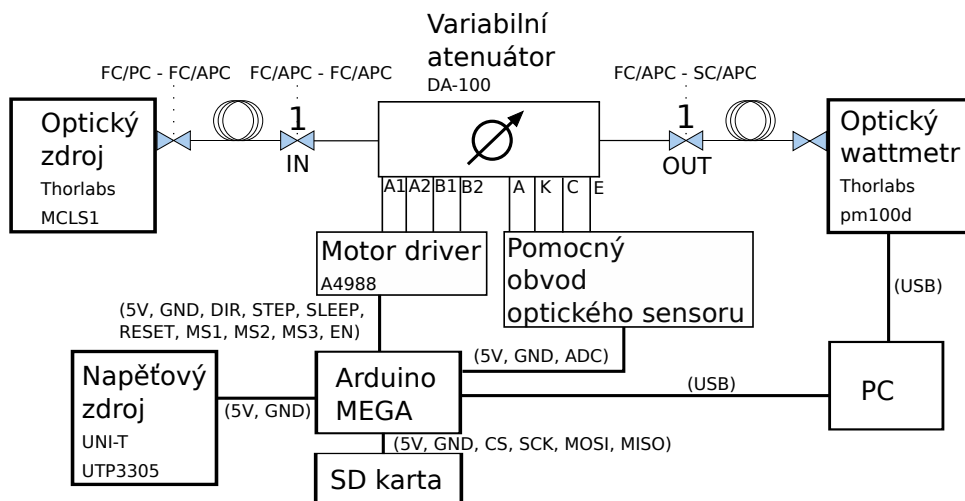
■ 3.1.7 Externí napájecí zdroj

Externí napájecí zdroj vývojové desky Arduino by měl být dle doporučení výrobce [33] 7 až 12 V. Při menším napájecím napětí může na 5 V pinech docházet k napětovým poklesům a mikrokontrolér s připojenými perifériemi se stane nestabilním. Když dojde k překročení maximálního napětí hrozí přehřátí napěťového regulátoru na desce a k celkovému poškození zařízení. Celkový odběr vývojové desky s připojenými a plně výkonově využitými perifériemi se pohybuje přibližně kolem 600 mA. Maximální proud napájecího zdroje doporučuji 800 mA, zhotovené zařízení není vybaveno výměnnou proudovou pojistkou.

3.2 Měření charakteristiky atenuátoru

Výrobce sice dodává k atenuátoru tabulku s útlumem v závislosti na poloze (příloha A.2), ale jednak není jasná výchozí poloha, jednak není udáno, jak se mění stav optické brány. Proto bylo přistoupeno k vlastnímu měření charakteristik.

Měření probíhalo dle uspořádání na obrázku 3.14. Pro prvotní měření byl napsán pomocný firmware, kde komunikace mezi mikrokontrolérem a PC je prováděna přes sériovou linku a ovládání atenuátoru je realizováno pomocí předdefinovaných příkazů zobrazených a popsanych v tabulce 3.2. Pro uživatelské prostředí sériové komunikace na PC byl využit program PuTTY a pro ukládání napětí optozávory byla využita SD karta. Z hlediska optického zapojení byl využit stabilizovaný zdroj na 1550 nm, jehož úroveň v rovině konektorů byla nejprve změřena wattmetrem Thorlabs PM100 s externím senzorem a následně byl do trasy vložen měřený atenuátor. Hodnoty wattmetru byly odečítány pomocí sériového rozhraní za použití desktopové aplikace Thorlabs Optical Power Monitor.



Obrázek 3.14: Uspořádání pro měření vložného útlumu a napětí optozávory v závislosti na krocích motoru

Přepočítání výstupní hodnoty AD převodníku na napětí je v programu realizováno za pomoci vzorce

$$U = (y + 0.5) \cdot \frac{U_{ref}}{2^N} [\text{V}] = (y + 0.5) \cdot \frac{5}{1024} [\text{V}], \quad (3.1)$$

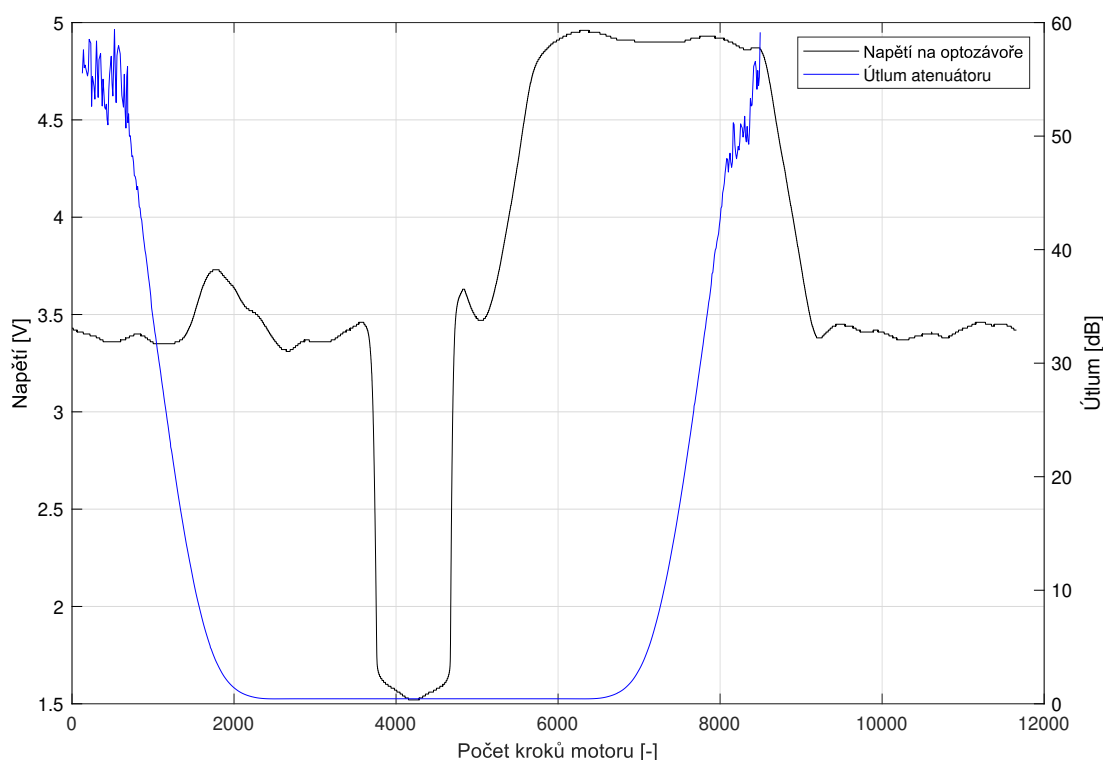
kde y označuje výstup AD převodníku, U_{ref} je jeho referenční napětí a N určuje počet bitů AD převodníku. Přičtením hodnoty 0.5 k výstupu převodníku je získán medián napětí mezi kvantizačními hladinami AD převodníku.

Měření probíhalo nejjednodušším možným způsobem, a to tak, že při kontinuálním pohybu motoru je v každé poloze snímáno napětí optozávory a po 10 krocích je zaznamenána úroveň prošlého výkonu. Z naměřených dat byla vybrána jedna perioda, která je vynesena do grafu na obrázku 3.15.

Tabulka 3.2: Tabulka příkazů pro pomocný firmware

"en"	povolí/zakáže napájení motoru (implicitně je napájení zakázáno)
"change dir"	změna směru otáčení motoru
"change size of steps"	nastavení velikosti jednoho kroku motoru ("1" = 1, "2" = 1/2, "3" = 1/4, "4" = 1/8, "5" = 1/16)
"change speed"	změna rychlosti otáčení (maximálně 500 kroků za sekundu)
"change number of steps"	změna počtu kroků v manuálním režimu ("4" a "6")
"manual move"	umožňuje pohyb motoru ve třech režimech a současné měření napětí na optozávoře ("7" a "9" realizuje nastavený počet kroků v určitém směru) ("4" a "6" realizuje pohyb v určitém směru, dokud je sériová linka volná) ("1" a "3" realizuje jeden krok v určitém směru) po provedení pohybu je počet kroků a odpovídající napětí posláno sériovou linkou
"auto move"	umožňuje pohyb motoru o určený počet kroků, změření napětí opt. senzoru v jednotlivých krocích, uložení aktuálního počtu kroků a odpovídajícího napětí na SD kartu (uživatel je pouze vyzván k zadání jména souboru a počtu kroků)

Poznámky k tabulce 3.2: Příkazy jsou zadávány bez uvozovek.



Obrázek 3.15: Graf závislosti vložného útlumu a napětí optozávory na poloze motoru pro vlnovou délku 1550 nm

3.3 Návrh a realizace softwarové části

Úkolem softwaru vývojové desky je nastavit výchozí pozici motoru, umožnit uživateli nastavení útlumu, podle nastaveného útlumu vyhledat na SD kartě odpovídající počet kroků a dle něj vykonat potřebné natočení motoru.

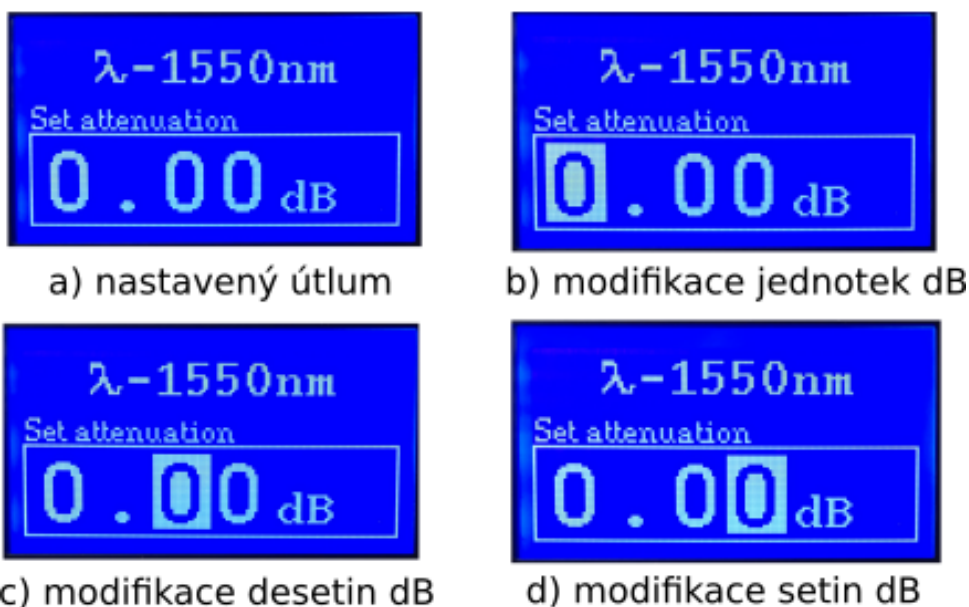
Firmware pro mikrokontrolér byl napsán v jazyce C++ s využitím prostředí Arduina IDE. Dále byly použity knihovny: U8glib, SPI a SD. Vývojový diagram programu je zobrazen na obrázku 3.18. Zdrojový kód je umístěn v elektronické příloze. Zařízení je prozatím kalibrováno pouze pro vlnovou délku 1550 nm. Běh navrženého programu začíná ve funkci `setup()`, kde jsou nastaveny všechny potřebné vstupní a výstupní piny a je inicializován LCD displej s SD kartou za pomoci SPI protokolu. Následně se program dostane do hlavní funkce `loop()`, na LCD displej je vykresleno logo ČVUT a po jedné sekundě je vykresleno úvodní menu. Úvodní menu je vidět na obrázku 3.16, kde jsou také popsány ovládací prvky zařízení.



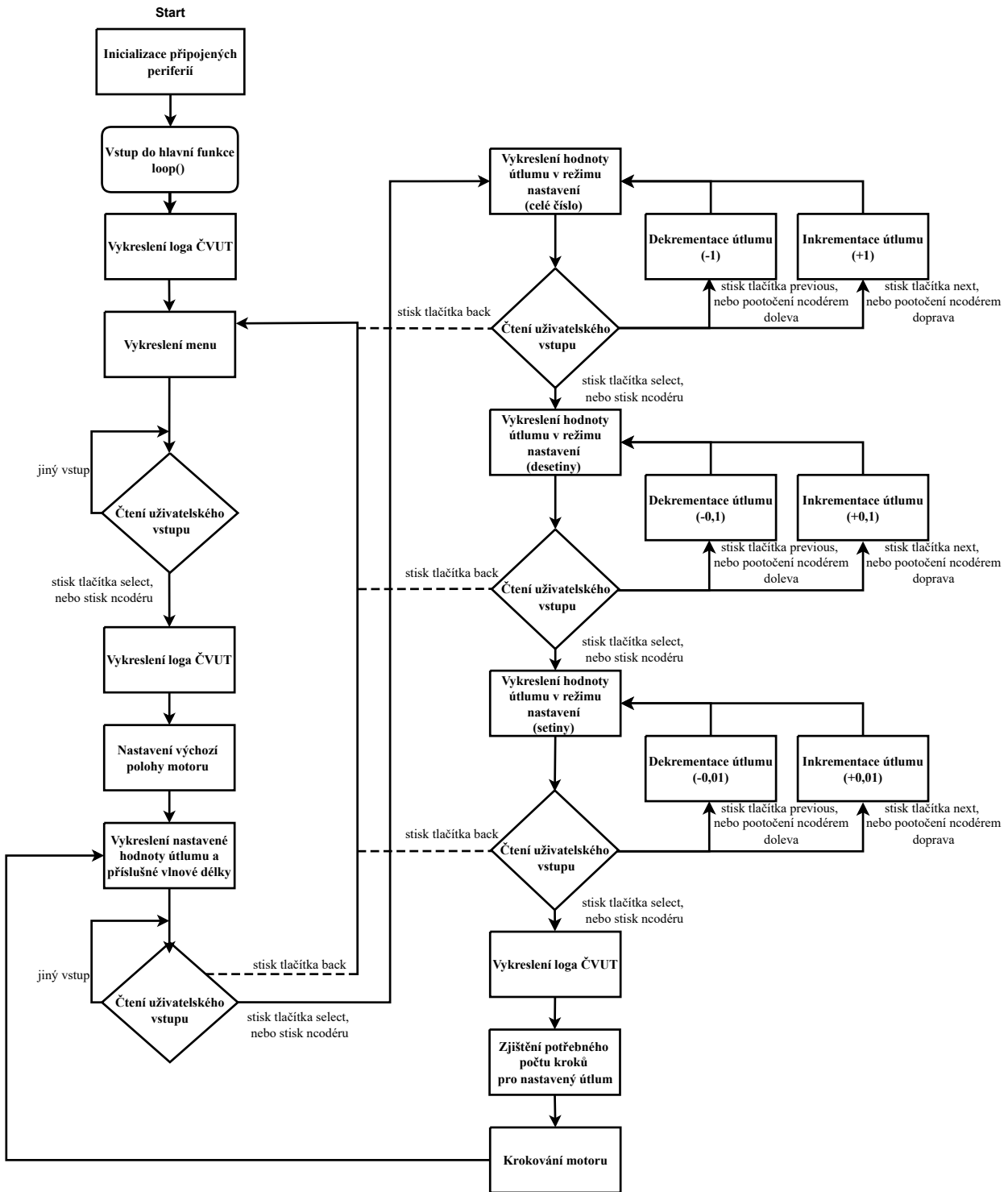
Obrázek 3.16: Úvodní menu zařízení s označenými tlačítky

Menu prozatím tvoří pouze jedna položka (*Set attenuation*). Po vykreslení menu se v nekonečné smyčce vyhodnocuje stisk tlačítek a poloha enkodéru. Při zvolení položky (volba je prováděna tlačítkem *Choose* nebo tlačítkem enkodéru) je vykresleno logo ČVUT a probíhá nastavení výchozí polohy motoru. Nastavení výchozí polohy motoru je podrobně popsáno v podsekcí 3.3.1. Dále je proveden předdefinovaný počet kroků motoru na pozici, kde se začíná měnit útlum v závislosti na jednotlivých krocích motoru. Nastavený útlum je v této

pozici minimální možný. Na LCD displej je následně vykreslen útlumový mód, který je zobrazen na obrázku 3.17. Poté jsou opět v nekonečné smyčce vyhodnocovány tlačítka a poloha enkodéru. Při prvním stisku tlačítka *Choose* nebo tlačítka enkodéru je umožněno nastavit jednotky útlumu, další stisk umožní upravit desetiny útlumu a třetím stiskem je možné nastavit setiny útlumu. Inkrementace útlumu se provádí pomocí tlačítka *Next* nebo pootočením enkodéru doprava. Dekrementaci útlumu umožňuje tlačítko *Previous* nebo pootočení enkodéru doleva. Čtvrtý stisk tlačítka *Choose* nebo tlačítka enkodéru vytiskne ČVUT logo, otevře se soubor *1550.txt*, který je uložen na SD kartě, mikrokontrolér si do své RAM paměti uloží počet kroků odpovídající nastavenému útlumu a soubor zavře. Následně je vypočítán potřebný počet kroků z aktuální pozice a směr otáčení. Poté je proveden pohyb motoru a na displej je vytištěn nastavený útlum. Nastavení lze provádět opakovaně. Pro návrat do úvodního menu stačí stisknout tlačítko *back*.



Obrázek 3.17: Displej zařízení v režimu nastavení útlumu



Obrázek 3.18: Vývojový diagram hlavního programu

3.3.1 Nastavení výchozí polohy motoru

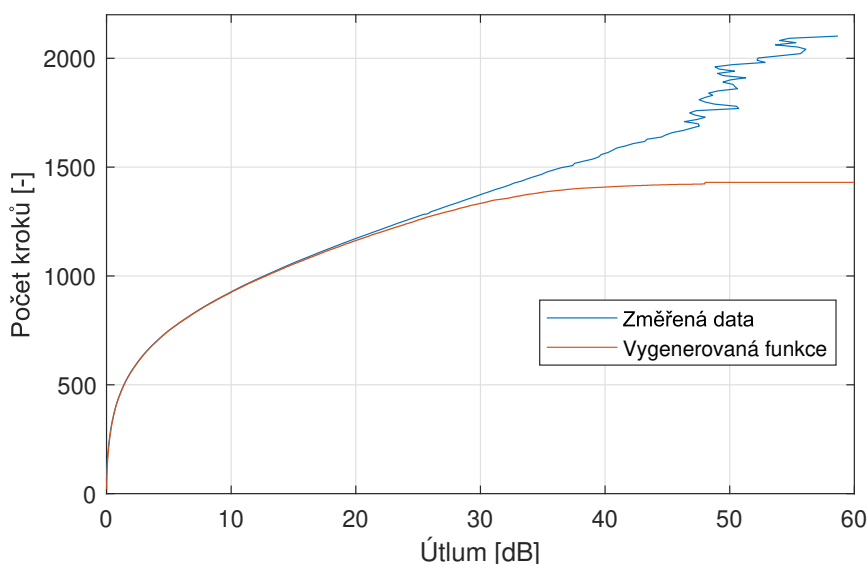
Výchozí poloha krokového motoru byla zvolena v místě, kde se napětí na fototranzistoru optozávory blíží saturaci. Z grafu 3.15 je vidět, že výstupní signál optozávory zde prochází dvakrát určitou rozhodovací úrovní. Byl vybrán průchod při nárůstu/poklesu napětí na 2 V, čemuž ve zmíněném grafu odpovídá 4675 kroků.

Algoritmus pro nalezení této pozice funguje tak, že je sledováno napětí na optozávore do doby, než překročí 2 V. Následně je změněn směr otáčení a poloha motoru je přesunuta na uloženou pozici, kdy se napětí senzoru nejvíce blížilo 2 V.

3.3.2 Uložená data na SD kartě

Data, která jsou uložena na SD kartě (soubor *1550.txt*), definují počet kroků motoru pro nastavený útlum při vlnové délce 1550 nm z rozsahu 0,01 až 60,00 dB. Útlum je v souboru reprezentován číslem řádku (například pro útlum 12,54 je počet kroků uložen v souboru na 1254 řádku). Řádek musí být vždy ukončen znakem nového řádku '\n', který při otevření souboru na PC není vidět. Aby mohl být soubor otevřen podle napsaného firmwaru, je nutné, aby název *1550.txt* zůstal zachován.

Naměřená závislost počtu kroků na vložném útlumu (měřena po 10 krocích v sekci 3.2) byla grafickou aplikací Curve fitting v prostředí Matlab proložena automaticky vygenerovanou racionální funkcí, ze které byly následně získány hodnoty pro SD kartu. Proložení změřených dat ukazuje obrázek 3.19. Data jsou umístěny v elektronické příloze jak ukazuje příloha A.5.



Obrázek 3.19: Proložení naměřených dat útlumu funkcí

■ 3.3.3 Speciální znaky tisknuté na LCD displej

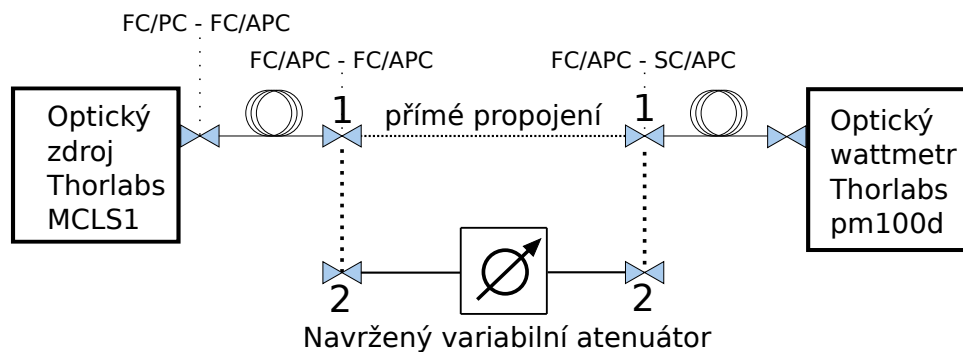
Knihovna Uglib8, využívaná v programu pro tisknutí znaků na LCD displej, neumožňuje tisk znaku lambda a pochopitelně ani ČVUT loga. Z tohoto důvodu bylo nutné vytvořit bitovou mapu, která následně mohla být zobrazena na displej.

V programu Paint.net byl vytvořen znak lambda o velikosti 11x16 pixelů a logo ČVUT zabírající celou velikost displeje 128x64 pixelů. Znaky byly následně pomocí programu LCDAssistant převedeny na hexadecimální znaky, kde jsou jednotlivé bity reprezentující pixely ukládány od levého horního rohu po jednotlivých řádcích. Znak lambda lze vidět na obrázku 3.17 a znak ČVUT je zachycen na fotce předního panelu zařízení na obrázku 3.3.

Kapitola 4

Měření navrženého zařízení

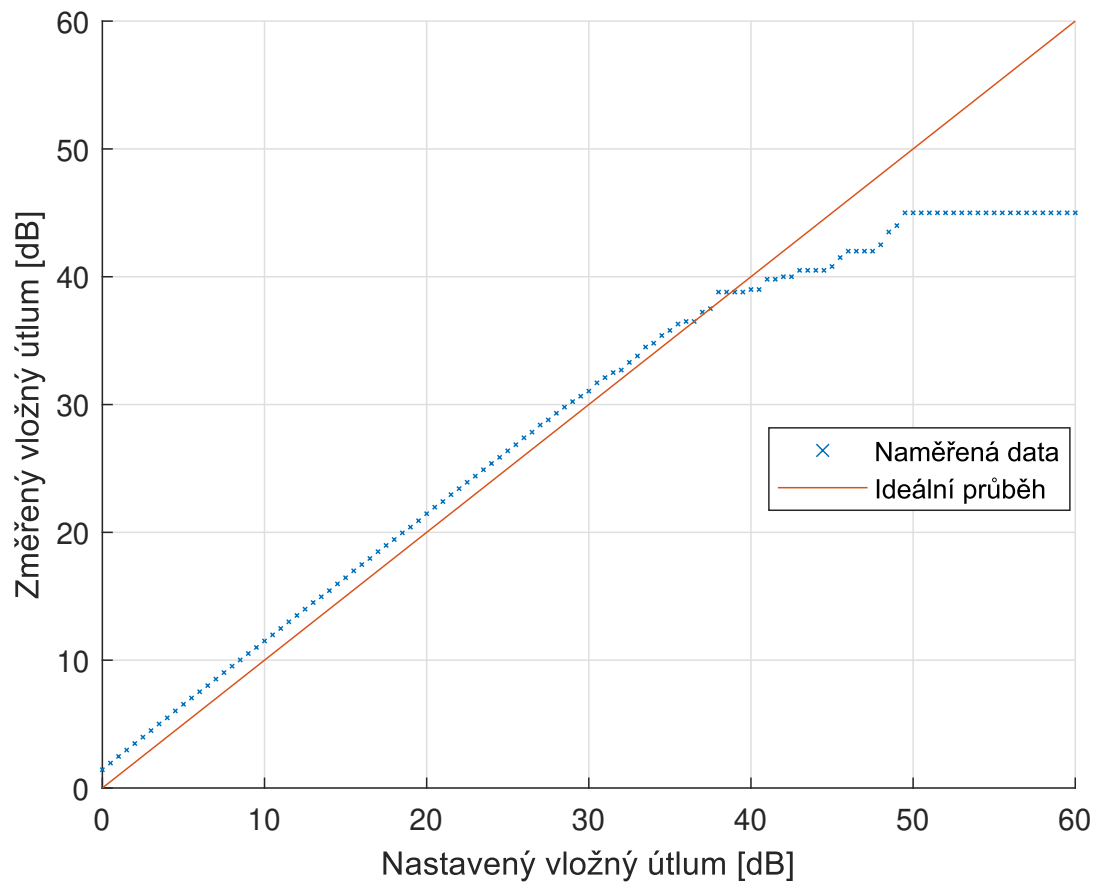
Výrobek byl změřen pomocí metody vložitelných ztrát, kdy byla nejprve zjištěna úroveň při přímém propojení wattmetru se zdrojem, a poté byl attenuátor vložen do obvodu. Zapojení demonstruje schéma na obrázku 4.1, kde jsou tyto dvě fáze měření označeny čísly 1 a 2.



Obrázek 4.1: Scéma měření finálního výrobku

Na optickém zdroji Thorlabs MCLS1 byla nastavena vlnová délka 1550 nm a výstupní výkon na 2,00 mW. Vlivem dvou konektorů typu FC/PC se úroveň snížila z odpovídajících 3,01 na 2,00 dBm. Po připojení attenuátoru, nastaveného ve výchozí poloze, úroveň výkonu poklesla na 0,57 dBm, což odpovídá vloženému útlumu 1,43 dB. Následně byl útlum nastavován na displeji attenuátoru po intervalech 0,50 dB a odečítán wattmetrem. Naměřená data jsou s ideálním průběhem vynesena do grafu na obrázku 4.2.

Z naměřených dat je patrné, že attenuátor je poměrně přesný do nastavené hodnoty 40,00 dB, kdy je odchylka od ideálního průběhu podobná jako ve výchozí poloze, tedy $\pm 1,43$ dB. Po překlenutí nastavené hodnoty 40,00 dB je odchylka stále zvětšována a při dosažení hodnoty 49,50 dB už reálný útlum není více inkrementován z hodnoty 45,00 dB. Nejpravděpodobnějším důvodem je nepřesné proložení reálného útlumu, protože vygenerovaná funkce, která je popsána v sekci 3.3.2, se začíná vychylovat od naměřených dat při útlumu 30,00 dB. V měření nebyla kompenzována nestabilita nuly (offset), která se projevuje zejména při velkých útlumech, tj. velmi malých úrovních signálu. Naměřená data jsou umístěna v elektronické příloze jak ukazuje A.5.



Obrázek 4.2: Závislost změřeného útlumu na nastaveném pro vlnovou délku 1550 nm

Kapitola 5

Závěr

Cílem bakalářské práce bylo vytvoření proměnného vláknového atenuátoru s hlavní motorem poháněnou komponentou DD-100. Po seznámení se s optickými vlastnostmi a principy atenuátorů byly vybrány nutné hardwarové komponenty. Následně byly navrženy desky plošných spojů pro uživatelské ovládání, propojení periferií s vývojovým kitem a optozávoru. Poté následovalo umístění všech komponent do šasi a naprogramování vývojové desky s mikrokontrolérem. Celek se napájí 7 až 12 V a spotřeba nepřesahuje 600 mA. Výsledné zařízení funguje spolehlivě, je kalibrováno pro vlnovou délku 1550 nm s rozsahem útlumu 0 až 60 dB, maximální odezva na nastavený útlum činí 20 sekund.

Měření vložného útlumu atenuátoru proběhlo metodou vložných ztrát po nastavovaném intervalu 0,50 dB a pro vlnovou délku 1550 nm. Nastavený útlum 0,00 dB odpovídal 1,45 dB, což se shoduje s katalogovým listem. Poté byla naměřena poměrně odpovídající závislost až do hodnoty 40,00 dB, kdy odchylka stále činila $\pm 1,45$ dB. Dále je reálný útlum inkrementován pomaleji než nastavovaný. Po překročení nastavené hodnoty 49,50 dB je reálný útlum stále 45,00 dB až do konce nastavovaného rozsahu 60,00 dB. Pro docílení správné kalibrace přes celý rozsah až do 60,00 dB je nutné proložit data jinou funkcí nebo zvolit jiný způsob získání dat pro SD kartu.

V budoucnu by bylo dobré kalibrovat zařízení pro více vlnových délek a zautomatizovat samotnou kalibraci. Také by mohlo proběhnout zjednodušení navržených plošných spojů tak, aby byly všechny použité komponenty umístěny pouze na jedné desce. Zařízení a styl napsaného softwaru jsou navrženy tak, aby budoucí změny nepředstavovaly větší problémy.

Literatura

- [1] NOVOTNÝ, Karel. *Optická komunikační technika*. Vyd. 3. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007, c1997. ISBN 978-80-01-03920-5.
- [2] *Fixed Fiber Optic Attenuators, Single Mode*. THORLABS [online]. [cit. 2022-07-05]. Dostupné z: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=1385
- [3] *SC/SC Single Mode 10dB Inline Optical Attenuator*. Fiberpatch-cords [online]. [cit. 2022-07-05]. Dostupné z: https://www.fiberpatch-cords.com/photo/pl311130056-sc_sc_single_mode_10db_inline_optical_attenuator.jpg
- [4] *ST/UPC Fiber Optic Attenuator*. L-com [online]. [cit. 2022-07-05]. Dostupné z: <https://www.l-com.com/fiber-optic-premium-fiber-attenuator-st-upc-10db>
- [5] *Variable Optical Attenuator SM*. Ultipulse [online]. [cit. 2022-07-05]. Dostupné z: <http://ultipulse.com/shop/variable-optical-attenuators/variable-optical-attenuator-voa-up01a/>
- [6] *Customized LC Fixed Fiber Optic Attenuator*. FS [online]. [cit. 2022-07-05]. Dostupné z: <https://www.fs.com/de-en/products/11820.html>
- [7] PASCHOTTA, Rüdiger. *Fiber-optic Attenuators*. RP Photonics [online]. [cit. 2021-12-01]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/fiber_optic_attenuators.html
- [8] *Fiber Optic Bulkhead Attenuator*. L-com [online]. [cit. 2022-07-05]. Dostupné z: <https://www.l-com.com/fiber-optic-bulkhead-attenuator-sc-10db-for-1550nm-foatsc-55-10d>
- [9] *Fixed Fiber Optic Attenuators, Multimode*. THORLABS [online]. [cit. 2022-07-05]. Dostupné z: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=10463&pn=FA02M
- [10] *Polarization Dependent Loss (PDL)*. Measurement Theory [online]. [cit. 2022-07-05]. Dostupné z:

<https://www.viavisolutions.com/en-us/literature/polarization-dependant-loss-pdl-measurement-theory-white-papers-books-en.pdf>

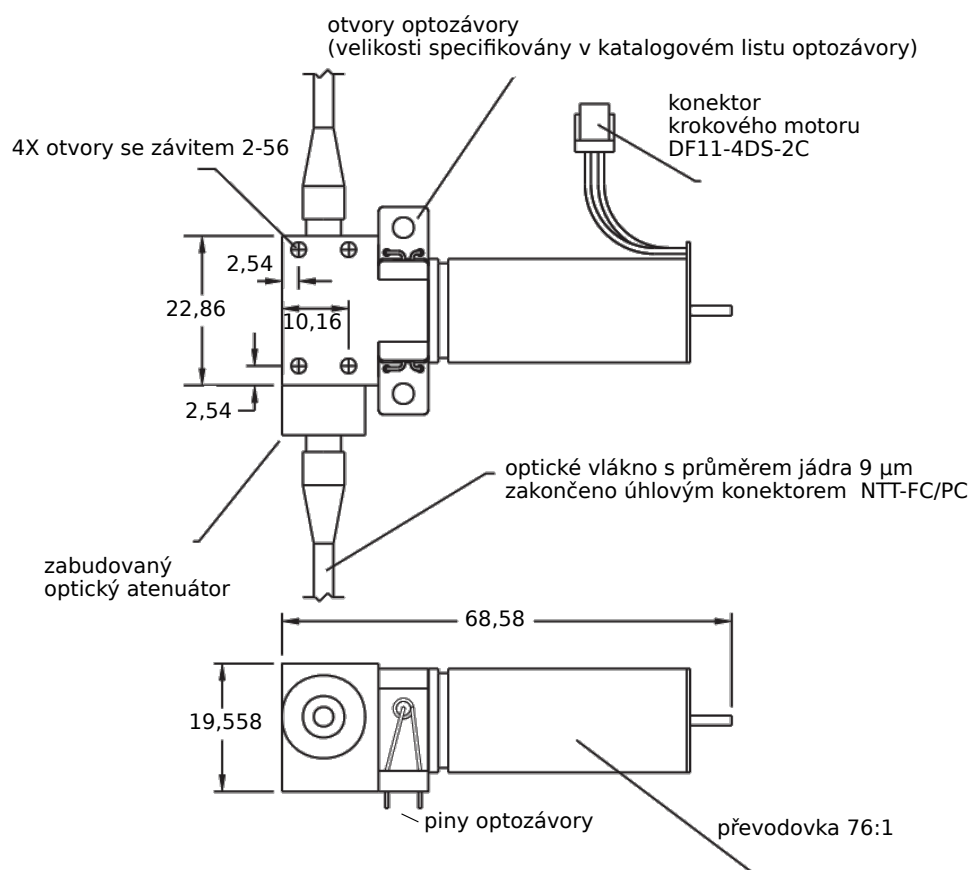
- [11] *Connector Loss, Return Loss, and Reflectance – “Highs and Lows”* flukenetwork [online]. [cit. 2022-01-26]. Dostupné z: <https://www.flukenetworks.com/blog/cabling-chronicles/return-loss-and-reflectance-fine-points>
- [12] *10GBASE-ZRC SFP+*. FS [online]. [cit. 2022-07-05]. Dostupné z: <https://www.fs.com/de-en/products/29799.html?attribute=9137&id=310905>
- [13] *R2862A Digital 2R Receiver* Dzsc [online]. [cit. 2022-07-05]. Dostupné z: <https://pdf.dzsc.com/R28/R2862A.pdf>
- [14] HUI, Rongqing a Maurice O’SULLIVAN. *Fiber Optic Measurement Techniques*. Elsevier Academic Press, 2009. ISBN 978-0-12-373865-3.
- [15] K. Ishikawa a Q. Yu, *An Integrated AWG multi/demultiplexer with MEMS-VOA shutters*. Devátá mezispolečenská konference o tepelných a termomechanických jevech v elektronických systémech. Vyd. 2, 2004, doi: 10.1109/ITHERM.2004.1318328.
- [16] John M. Senior. *Optical Fiber Communications: Principles and Practice*. Vyd. 3. Pearson Education, 2009. ISBN 978-0-13-032681-2.
- [17] *The Ultimate Guide to Fiber Optic Attenuators*. FS community [online]. [cit. 2022-01-26]. Dostupné z: <https://community.fs.com/blog/basics-of-fiber-optic-attenuator.html#Working%20Principles>
- [18] M. Kihara a H. Watanabe, *Corrections to Investigation Into Optical Performance of Fiber Connections With Imperfect Physical Contact* V časopise Lightwave Technology. Vyd. 34, doi: 10.1109/JLT.2016.2579650.
- [19] *Variable Fiber Optical Attenuators for Multimode Patch Cables*. THORLABS [online]. [cit. 2022-01-26]. Dostupné z: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=11173
- [20] Zendehtnam, A., Mirzaei, M., Farashiani, A. et al. *Investigation of bending loss in a single-mode optical fibre*. Nakladatelství Pramana - J Phys, 2010. Springer [online]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s12043-010-0052-5>
- [21] *FIS 3 step attenuators*. Fiberinstrumentsales [online]. [cit. 2022-01-26]. Dostupné z: <https://www.fiberinstrumentsales.com/specs/3-Step-Attenuators.pdf>
- [22] CAI, H., X.M. ZHANG, C. LU, A.Q. LIU a E.H. KHOO. Linear MEMS variable optical attenuator using reflective elliptical mirror. *IEEE Photonics Technology Letters*. 2005, [cit. 2022-01-26]. ISSN 1041-1135, doi:10.1109/LPT.2004.840056.

- [23] *MEMS VOA*. Lucentek [online]. [cit. 2022-01-26]. Dostupné z: <http://www.lucentek.com/?cat=156>
- [24] *APPLICATION NOTE DA-100*. Artisantg [online]. [cit. 2022-01-26]. Dostupné z: https://www.artisantg.com/info/OZ_Optics_DA_100_Series_Application_Note.pdf
- [25] *VOA780PM-APC - PM Variable Attenuator, 780 ± 20 nm, 50 dB, FC/APC*. Thorlabs [online]. [cit. 2022-01-26]. Dostupné z: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=VOA780PM-APC>
- [26] *Neutral Density Filters*. RP Photonics [online]. [cit. 2022-01-26]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/neutral_density_filters.html
- [27] *VARIABLE FIBER OPTIC ATTENUATOR BB-500-11-850-50/125-M-35-XX-3-1-ND* Findlight [online]. [cit. 2022-01-26]. Dostupné z: <https://www.findlight.net/fiber-optics/fiber-optomechanics/fiber-optic-attenuators/variable-fiber-optic-attenuator-bb-500-11-850-50125-m-35-xx-3-1-nd>
- [28] *DD-100 Datasheet (PDF)* OZOptics [online]. [cit. 2022-01-26]. Dostupné z: https://www.ozoptics.com/ALLNEW_PDF/DTS0010.pdf
- [29] *Atmel ATmega640/V-1280/V-1281/V-2560/V-2561/V* Microchip [online]. [cit. 2022-01-26]. Dostupné z: https://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/atmel-2549-8-bit-avr-microcontroller-atmega640-1280-1281-2560-2561_datasheet.pdf
- [30] *MOS Microstepping Driver with Translator And Overcurrent Protection* Pololu [online]. [cit. 2022-01-26]. Dostupné z: https://www.pololu.com/file/0J450/a4988_DMOS_microstepping_driver_with_translator.pdf
- [31] *Inkrementální Encodér* GME [online]. [cit. 2022-01-26]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/inkrementalni-spinac-ec11-1s>
- [32] *Mikrospínač do DPS* GME [online]. [cit. 2022-01-26]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/tc-0111-t>
- [33] *Arduino Mega 2560*. Arduinio [online]. [cit. 2022-01-26]. Dostupné z: <https://store.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3>

Příloha A

Přílohy

A.1 Rozměry a popis atenuátoru DD-100



Poznámka: Všechny udávané rozměry jsou v jednotkách mm

A.2 Certifikát atenuátoru DD-100

OZ OPTICS LTD.
 219 Westbrook Rd.
 Carp, Ontario, Canada, K0A 1L0
Tel: 613-831-0981 **Toll Free:** 1-800-361-5415 **Fax:** 613-836-5089
 Website: www.ozoptics.com
 Email: sales@ozoptics.com

Certificate of Compliance

Customer: Czech Technical University in Prague

Serial #: 160527-1

P.O.#: 1311720104

Work Order #: 160527

Part #: DD-100-11-1550-9/125-S-60-3A3A-1-1-485:1-6-PC

Fiber Core/Cladding in micron: 9/125

Fiber NA: 0.13

Test Wavelength (nm): 1550

Insertion Loss(dB): 1.1

Steps	Attenuation Reading (dB)	
	Up 1	Down 1
0	0	0
5500	3.59	3.57
6000	10.07	10.04
6500	20.62	20.59
7000	33.58	33.48
7500	48.07	47.87
7950	61.79	61.87

Notes: Insertion Loss Value included one connector loss.

OZ Optics certifies that the above items have been assembled and tested at OZ Optics Ltd., and are in full compliance of all quoted specifications, drawings, and correspondence. Test results and other documentation of quality are kept at OZ Optics Ltd., and are available for review by the customer.

Test Engineer: T.Cheng

Date: 27 July 2012

A.3 Katalogový list krokového motoru Faulhaber AM1524



Stepper Motors

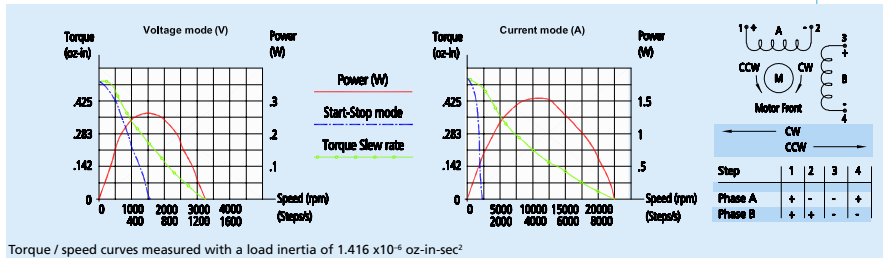
Two phases, 24 steps per revolution

For combination with:
Gearheads: 15/A, 15/5, 15/8, 16A & 16/7
Encoder: HE
Drive Electronics: AD VL M, AD VM M, AD CM M

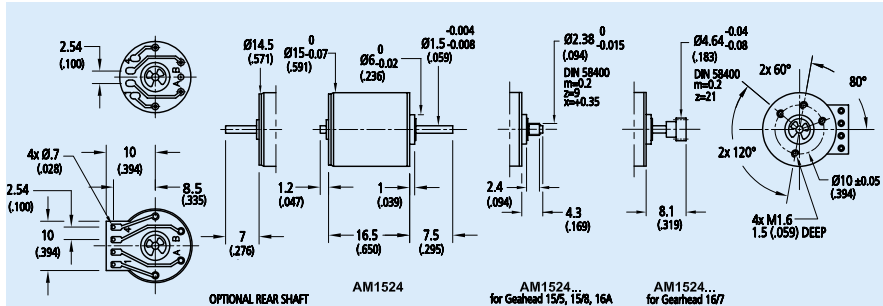
Series AM 1524

	V 3	V 6	V 12	V 24	A 0.25	
1 Nominal supply voltage U_n	3	6	12	24		V DC
2 Phase resistance at 20°C (68°F)	10	35	150	590	12.5	Ω
3 Phase inductance (1kHz)	4.25	15	65	239	5.5	mH
4 Nominal current per phase (both phases ON)	0.28	0.15	0.075	0.037	0.25	A
5 Back EMF amplitude	3.1	6	12	24	3.5	V/k step/s
6 Holding torque ¹⁾ (with nominal current in both phases)	0.850					oz-in
7 Holding torque ¹⁾ (with twice the nominal current)	1.416					oz-in
8 Residual and friction torque	0.127					oz-in
9 Thermal resistance winding-ambient air	37					°C/W
10 Maximum winding temperature	130 (266)					°C (°F)
11 Ambient temperature range	-40 to +70 (-40 to +158)					°C (°F)
12 Thermal time constant	220					s
13 Full step angle	15					degree
14 Angular accuracy ²⁾	± 10					% of full step
15 Rotor inertia	$6.4 \cdot 10^{-6}$					oz-in-sec ²
16 Shaft bearings	sintered bronze sleeves (standard)	ball bearings, preloaded (optional)				
17 Shaft load, max.:						
- radial (3 mm (0.118 in) from bearing)	1.8	21.6				oz
- axial	1.8	10.8				oz
18 Shaft play, max.:						
- radial (0.720 oz)	$0.59 \cdot 10^{-3}$	$0.47 \cdot 10^{-3}$				in
- axial (0.720 oz)	$5.9 \cdot 10^{-3}$	-0				in
19 Weight	0.42					oz
20 Isolation test voltage	200					V DC
21 Resonance frequency	120					Hz
22 Electrical time constant	0.4					ms

¹⁾ with bipolar driver
²⁾ 2 phases ON, balanced phase current



Torque / speed curves measured with a load inertia of 1.416×10^{-6} oz-in-sec²



MicroMo Electronics, Inc. · 14881 Evergreen Avenue · Clearwater · FL 33762-3008 · Toll-Free: (800) 807-9166 · Fax: (727) 573-5918 · info@micromo.com · www.micromo.com

A.4 Katalogový list převodovky Faulhaber 15/18



Spur Gearheads
Zero Backlash

0,1 Nm

For combination with
DC-Micromotors
Stepper Motors

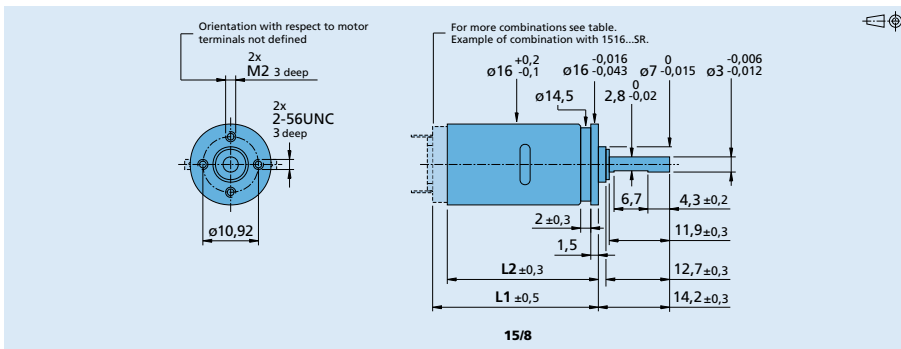
Series 15/8

	15/8
Housing material	metal
Geartrain material	steel
Recommended max. input speed for:	
- continuous operation	5 000 min ⁻¹
Backlash, at no-load	0 °
Bearings on output shaft	ball bearings, preloaded
Shaft load, max.:	
- radial (6,5 mm from mounting face)	≤ 25 N
- axial	≤ 5 N
Shaft press fit force, max.	≤ 5 N
Shaft play	
- radial (6,5 mm from mounting face)	≤ 0,03 mm
- axial	= 0 mm
Operating temperature range	- 30 ... + 100 °C

Technical data	4	4	5	5	6	6
Number of gear stages	4	4	5	5	6	6
Continuous torque	100	100	100	100	100	100
Intermittent torque	300	150	300	150	300	150
Mass without motor, ca.	24	24	26	26	28	28
Efficiency, max.	-	-	-	-	-	-
Direction of rotation, drive to output	=	=	≠	≠	=	=
Reduction ratio ¹⁾ (rounded)	76:1	141:1	262:1	485:1	900:1	1 670:1
L2 [mm] = length without motor	32,0	32,0	34,1	34,1	36,2	36,2
L1 [mm] = length with motor	1516E...SR 34,9	1516E...SR 34,9	1524E...SR 42,9	1524E...SR 42,9	AM1524...S7 45,0	AM1524...S7 45,0
	35,5	35,5	37,6	37,6	39,7	39,7

¹⁾ The reduction ratios are rounded, the exact values are available on request or at www.faulhaber.com.

Note: These gearheads are available only with motors mounted.



For notes on technical data and lifetime performance refer to "Technical Information".
Edition 2020 Feb. 18

© DR. FRITZ FAULHABER GMBH & CO. KG
Specifications subject to change without notice.

A.5 Seznam elektronických příloh

- [-] Firmware
 - [-] Konečný program
 - [-] finalní_program.txt
 - [-] Pomocný program určen pro první měření
 - [-] atenuator_serial.txt
- [-] Naměřená data
 - [-] Finální výrobek - závislost změřeného útlumu na nastaveném
 - [-] Naměřená data.xlsx
 - [-] Kroky motoru v závislosti na útlumu a napětí optozávory
 - [-] Naměřená data.xlsx
- [-] Navržené DPS
 - [-] Deska pro optozávoru
 - [-] footprint.pdf
 - [-] schéma.pdf
 - [-] Seznam materiálu.xlsx
 - [-] Deska pro uživatelské ovládání
 - [-] footprint.pdf
 - [-] schéma.pdf
 - [-] Seznam materiálu.xlsx
 - [-] Propojovací deska s vývojovým kitem Arduino Mega
 - [-] footprint.pdf
 - [-] schéma.pdf
 - [-] Seznam materiálu.xlsx
- [-] Soubor na SD kartě
 - [-] 1550.txt