

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A TELEKOMUNIKACÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Napájecí zdroj pro laser

Autor: Bc. Pavel Brožovský

Vedoucí práce: Ing. Václav Kraus

2014

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Pavel BROŽOVSKÝ**
Osobní číslo: **E13N0098P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a aplikovaná informatika**
Název tématu: **Napájecí zdroj pro laser**
Zadávající katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Prostudujte vlastnosti a možnosti dostupných polovodičových laserů.
2. Prostudujte možnosti napájení polovodičových laserů.
3. Navrhněte napájecí modul pro polovodičový laser s digitálním řízením.
4. Realizujte navržený napájecí modul.
5. Zhodnoťte dosažené výsledky.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

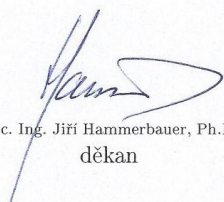
Student si vyhledá sám potřebnou literaturu dle pokynů vedoucího.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Václav Kraus

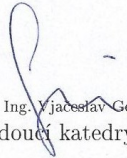
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Datum zadání diplomové práce: 14. října 2013

Termín odevzdání diplomové práce: 12. května 2014


Doc. Ing. Jiri Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Dr. Ing. Václav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Anotace

Předkládaná diplomová práce se zabývá návrhem napájecího zdroje pro laserovou diodu. Využití nachází při měření vibrací lopatek parních turbín. V první kapitole je uvedena historie laserů, dále fyzikální principy, materiály laserů, útlum světla v prostředí, druhy laserových diod, možnosti jejich využití, monitorování lopatek parních turbín a bezpečnost práce s lasery. Druhá část se věnuje možnostem napájení laserů, popisuje hlavní parametry laserů a jejich režimy. Třetí kapitola je věnována dostupnosti laserů na trhu. Další kapitola se zabývá návrhem napájecího modulu s digitálním řízením pomocí mikroprocesoru a následující popisuje jeho realizaci. V poslední části jsou zhodnoceny dosažené výsledky.

Klíčová slova

Polovodičový laser, laserová dioda, stimulovaná emise, napájecí zdroj, vibrace lopatek parních turbín

Abstract

The master theses deals with the design of the power supply for the diode laser. It is used in measuring of blade vibrations of the steam turbine. The first chapter describes their history, then physical principles, materials of lasers, attenuation of light in a medium, types of diode lasers, their utilization, monitoring of steam turbine blades and laser safety. The second part describes the laser power options, main parameters and their modes. The third chapter is devoted to the availability of diode lasers on the market. The next chapter deals with the design of the power supply module with the digital control by microprocessor and following one describes its implementation. In the last section the results are evaluated.

Keywords

Semiconductor laser, diode laser, stimulated emission, power supply, blade vibration of steam turbine

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 12.5.2014

Jméno příjmení

.....

Poděkování

Touto cestou bych velice rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Václavu Krausovi za trpělivost, odborné vedení, užitečné rady a připomínky při zpracování mé diplomové práce.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ	10
ÚVOD	13
1 VLASTNOSTI A MOŽNOSTI POLOVODIČOVÝCH LASERŮ	14
1.1 HISTORIE LASERŮ	14
1.2 FYZIKÁLNÍ PRINCIPY LASERU.....	15
1.3 MATERIÁLY LASERŮ	16
1.4 ÚTLUM SVĚTLA V PROSTŘEDÍ	18
1.5 DRUHY POLOVODIČOVÝCH LASEROVÝCH DIOD	19
1.5.1 Homostrukturní lasery (HoL).....	19
1.5.2 Heterostrukturní lasery (HL)	20
1.5.3 Lasery s rozprostřenou zpětnou vazbou (DFBL)	21
1.5.4 Lasery s kvantovými jámami (QWL).....	21
1.5.5 Lasery hranově vyzářující (EEL)	22
1.5.6 Lasery plošně vyzářující (VCSEL)	22
1.6 VLASTNOSTI A MOŽNOSTI POUŽITÍ POLOVODIČOVÝCH LASEROVÝCH DIOD	23
1.7 MONITOROVÁNÍ LOPATEK PARNÍCH TURBÍN	24
1.8 BEZPEČNOST PRÁCE.....	25
2 MOŽNOSTI NAPÁJENÍ LASERŮ	26
2.1 PARAMETRY LASERŮ	28
2.2 REŽIMY LASERŮ	30
2.2.1 Kontinuální	30
2.2.2 Impulzní	30
3 NABÍDKA LASERŮ NA TRHU	31
4 NÁVRH NAPÁJECÍHO MODULU S DIGITÁLNÍM ŘÍZENÍM	38
4.1 BLOKOVÉ SCHÉMA.....	38
4.2 POPIS JEDNOTLIVÝCH BLOKŮ.....	38
4.2.1 Laserová dioda.....	38
4.2.2 Teplotní senzor, chladič.....	39
4.2.3 Napájecí zdroj pro LD	39
4.2.4 Fotodioda.....	39
4.2.5 Ochranné bloky.....	40
4.2.6 Mikrokontrolér (MCU)	40

5	REALIZACE NAPÁJECÍHO MODULU	41
5.1	ZDROJ	41
5.1.1	<i>Schéma zapojení.....</i>	<i>41</i>
5.1.2	<i>Popis funkce.....</i>	<i>41</i>
5.1.3	<i>Simulace.....</i>	<i>43</i>
5.1.4	<i>Konstrukce a oživení.....</i>	<i>45</i>
5.1.5	<i>Naměřené hodnoty.....</i>	<i>46</i>
5.2	ŘÍZENÍ	48
ZÁVĚR	50	
SEZNAM LITERATURY	51	
SEZNAM PŘÍLOH.....	54	
PŘÍLOHY.....	55	

Seznam zkratk a symbolů

LASER	zesilovač světla pomocí stimulované emise (z angl. Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)
MASER	zesilovač mikrovlnného záření pomocí stimulované emise (z angl. Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation)
IBM	přední světová společnost v oboru informačních technologií (z angl. International Business Machines)
HoL	homostrukturální laser (z angl. Homostructure Laser)
HL	heterostrukturální laser (z angl. Heterostructure Laser)
DFBL	laser s rozprostřenou zpětnou vazbou (z angl. Distributed Feed Back Laser)
QWL	laser s kvantovými jámami (z angl. Quantum Wells Laser)
EEL	hranově vyzařující laser (z angl. Edge Emitting Laser)
VCSEL	plošně vyzařující laser (z angl. Vertical Cavity Surface Emitting Laser)
ESD	elektrostatický výboj (z angl. Electrostatic Discharge)
PIN dioda	vysokofrekvenční dioda s vodivostí typu P, N a I
LED dioda	polovodičová součástka vyzařující světlo (z angl. Light Emitting Diode)
BTT	metoda pro měření vibrací lopatek parních turbín (z angl. Blade Tip Timing)
FET	tranzistor řízený elektrickým polem (z angl. Field Effect Transistor)
RISC	procesor se zjednodušeným souborem instrukcí (z angl. Reduced Instruction Set Computer)
AVR	typ mikroprocesoru pojmenovaný po svých tvůrcích (Alf Egil Bogen, Vegard Wollan, Risc processor)
MCU	mikrokontrolér (z angl. Micro Controller Unit)
EEPROM	elektricky mazatelná paměť (z angl. Electrically Erasable Programmable Read Only Memory)
SRAM	statická polovodičová paměť (z angl. Static Random Access Memory)
ISP	programování uvnitř obvodu bez nutnosti vyjmutí (z angl. In System Programming)
SPI	sériové periferní rozhraní (z angl. Serial Peripheral Interface)

USART	synchronní / asynchronní sériové rozhraní (z angl. Universal Synchronous / Asynchronous Receiver and Transmitter)
MISO	směr komunikace SPI mezi řídicí jednotkou a periferií (z angl. Master In Slave Out)
MOSI	směr komunikace SPI mezi řídicí jednotkou a periferií (z angl. Master Out Slave In)
SCK	hodinový signál (z angl. System Clock)
JTAG	standard pro testování plošných spojů (z angl. Joint Test Action Group)
PWM	pulzně šířková modulace (z angl. Pulse Width Modulation)
FTDI	integrovaný obvod s podporou USB rozhraní (z angl. Future Technology Devices International)
E	energie [eV]
λ	vlnová délka [m]

Seznam obrázků

- Obr. 1.1: Ilustrační fotografie laseru.
- Obr. 1.2: Absorpce, spontánní emise a stimulovaná emise.
- Obr. 1.3: Přímý a nepřímý zakázaný pás polovodičů.
- Obr. 1.4: Absorpce světelného záření ve vodě v závislosti na vlnové délce.
- Obr. 1.5: Homostrukturní laser.
- Obr. 1.6: Heterostrukturní laser s dvojitou heterostrukturou (DHL).
- Obr. 1.7: Laser s rozprostřenou zpětnou vazbou.
- Obr. 1.8: Hranově vyzařující laser.
- Obr. 1.9: Plošně vyzařující laser.
- Obr. 2.1: Blokový diagram řídicího obvodu LD.
- Obr. 2.2: Výstupní optický výkon v závislosti na proudu v propustném směru.
- Obr. 4.1: Blokové schéma napájecího modulu pro LD při měření parních turbín
- Obr. 5.1: Schéma zapojení napájecího zdroje.
- Obr. 5.2: Schéma obvodu pro simulaci.
- Obr. 5.3: Simulace regulace napětí.
- Obr. 5.4: Simulace regulace proudu.
- Obr. 5.5: Simulace zatěžovací charakteristiky.
- Obr. 5.6: Změřené zatěžovací charakteristiky zdroje.
- Obr. 5.7: Blokové schéma řídicího obvodu

Seznam tabulek

- Tab. 1: Nabídka dostupných LD.
- Tab. 2: Nabídka dostupných LD s monitorovací fotodiodou.
- Tab. 3: Nabídka dostupných laserových modulů.
- Tab. 4: Nabídka samostatných fotodiod.
- Tab. 5: Laserové diody vhodné k připojení na optické vlákno.
- Tab. 6: Hodnoty zatěžovací charakteristiky (30 V, 1 A)
- Tab. 7: Hodnoty zatěžovací charakteristiky (15 V, 1 A)
- Tab. 8: Hodnoty zatěžovací charakteristiky (15 V, 0,5 A)

Úvod

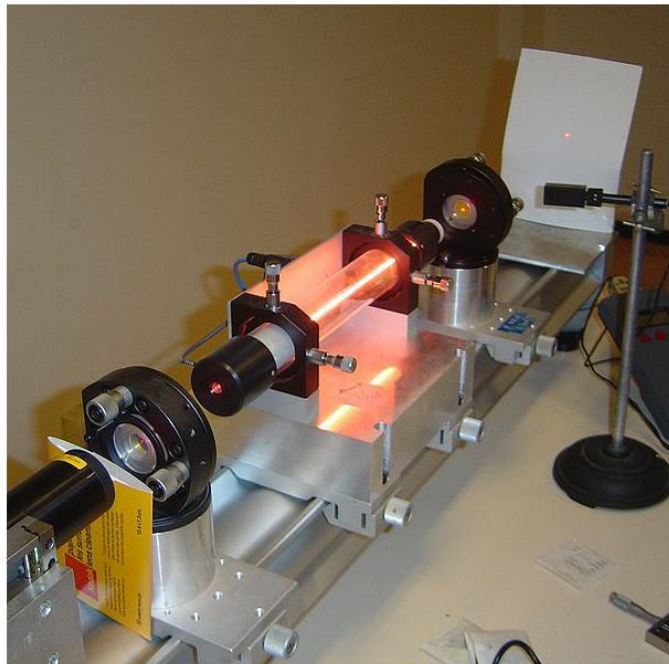
U parních turbín velkých výkonů pro výrobu elektrické energie se stále více využívají lopatky s bandáží. Bandáž se nachází na špičce oběžné lopatky a je s ní pevně spojena. Bandáž zabraňuje přetékání páry přes okraj lopatky, čímž zlepšuje proudění páry v turbíně a zvyšuje tak její účinnost [28]. Dále také snižuje dynamické namáhání, které způsobují vibrace lopatek. Aby se zabránilo haváriím těchto strojů, je třeba monitorovat namáhání lopatek, jejich poškození a zbytkovou životnost. Jako nejvhodnější se jeví bezkontaktní měřicí systém, který by tyto informace podával za provozu. Pro vysoké nároky na snímač jako jsou vysoké obvodové rychlosti nebo prostředí vodní páry, se kromě jiných fyzikálních principů snímání používá i optický. Základem tohoto principu je polovodičová laserová dioda [20]. Tyto diody jsou dnes pravděpodobně nejpoužívanější a mají oproti jiným laserům mnoho výhod, které budou popsány spolu s možnostmi využití v kapitole 1.6. Základním prvkem bezkontaktního měřicího systému je volba zdroje, který napájí laserové diody umístěné kolem obvodu parní turbíny. Tyto diody vysílají světelný paprsek na lopatky parních turbín, který se odráží zpět. Snímané odrazy světla se analyzují a poskytují tak velmi důležité informace o vibracích turbín.

Cílem této diplomové práce je teoretický rozbor problematiky laserů a konstrukce digitálně řízeného napájecího zdroje pro laserové diody. Zdroj bude využit pro měření vibrací lopatek parních turbín.

V první kapitole jsou shrnuty informace o polovodičových laserech. Čtenáři se mj. dozví, co jsou to lasery, na jaké fyzikální podstatě pracují a kde se nejvíce používají. Ve druhé kapitole je popsána problematika a možnosti napájení laserů. Jsou zde uvedeny i jejich hlavní parametry. Třetí část je věnována nabídce dostupných polovodičových laserových diod a laserových modulů na trhu. Návrhu napájecího zdroje pro laserové diody je věnována čtvrtá kapitola. Následující se zabývá vlastní konstrukcí a naměřenými hodnotami. V závěrečné části jsou pak zhodnocené dosažené výsledky a navržena případná vylepšení.

1 Vlastnosti a možnosti polovodičových laserů

LASER (z angl. Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) je moderní optický zdroj světelného záření, který se svým principem zásadně liší od běžných zdrojů. Světelný paprsek vycházející z laseru je koherentní a monochromatický [1], [2].



Obr. 1.1: Ilustrační fotografie laseru [2].

1.1 Historie laserů

Počátky vzniku laserů se datují do roku 1917, kdy Albert Einstein předpověděl stimulovanou emisi záření a popsal tak v podstatě fyzikální princip laseru.

Ještě než byl LASER zkonstruován, vznikl kolem roku 1953 tzv. MASER (z angl. Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation), což bylo zařízení fungující na stejném principu jako laser, ale zesilovalo mikrovlnné záření.

Samotný laser však vznikl až 16. května roku 1960. Za jeho vynálezce je považován Theodore Herold Maiman, který jako první dokončil „optický maser“, čili laser. O konstrukci prvního laseru se snažilo mnoho fyziků po celém světě např. v IBM nebo Bellových laboratořích. První polovodičový laser dokončil v roce 1962 Robert N. Hall [3].

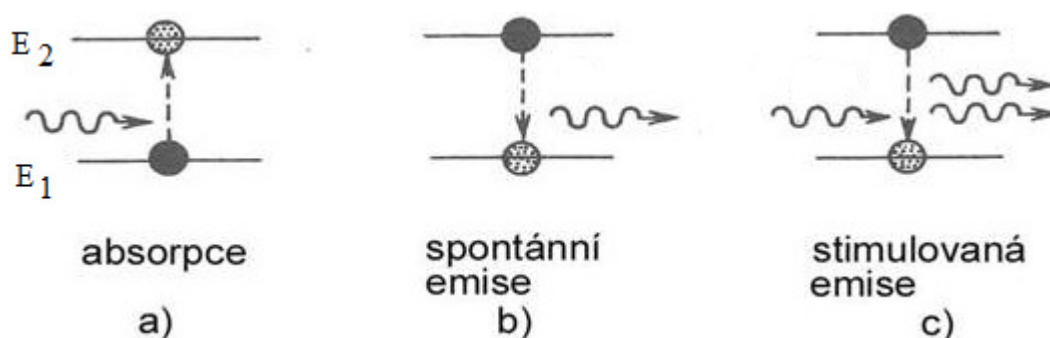
1.2 Fyzikální principy laseru

Funkce laserové diody je založena na principu elektroluminiscence polovodičových materiálů. Světelný paprsek vzniká při přeskočení elektronů z vyššího energetického pásu do nižšího. Při takovémto přeskočení dochází k uvolnění energie ve formě fotonu, která je dána následujícím vztahem 1.1:

$$E_{\text{fotonu}} = E_{\text{vod}} - E_{\text{val}} \quad [eV], \quad (1.1)$$

kde E_{vod} je energie vodivostního pásu a E_{val} je energie valenčního pásu.

Přechod z vyššího, vybuzeného, energetického stavu do stavu s nižší energií může proběhnout dvěma způsoby. Buď spontánní emisí, na které je založena funkce LED diod nebo stimulovanou emisí (také vynucená či indukovaná). Proces stimulované emise je důležitý pro činnost laserů a vychází ze zákonů kvantové fyziky [1]. Pomocí následujícího obr. 1.2 bude popsán princip spontánní a stimulované emise.



Obr. 1.2: Absorpce, spontánní emise a stimulovaná emise [5].

Elektrony v atomu se mohou nacházet na různých energetických hladinách. A platí pro ně, že čím dále se nacházejí od jádra, tím mají vyšší energii. Pro jednoduchost budeme uvažovat pouze dvě hladiny E_1 a E_2 . Pokud se elektron nachází na nižší energetické hladině v tzv. základním stavu a absorbuje energii od fotonu (obr.1.2a), přejde do stavu s vyšší energií. Tento stav se nazývá tzv. excitovaný. Zde setrvává elektron jen velmi krátkou dobu (10^{-7} až 10^{-3} s), poté se vrací do základního stavu a současně se vyzáří foton. Nyní se jedná o tzv. spontánní emisí (obr. 1.2b), kdy je foton o energii rovné rozdílu energetických hladin ($E = E_2 - E_1$) vyzářen náhodným směrem s náhodnou fází.

Ke stimulované emisi dochází (obr. 1.2c), když do excitovaného stavu přiletí foton, který způsobí přechod elektronu do základního stavu a je emitován další foton, který má stejné vlastnosti. Jedná se o vlnovou délku (energií), směr, fázi a polarizaci [6].

Aby došlo ke stimulované emisi, musí být splněny tři podmínky vzniku laserového záření:

- Aktivní prostředí - nejčastěji používané je prostředí tvořené GaAs. To umožňuje dostatečně velké zesílení fotonů.
- Inverze populace - buzením aktivního prostředí (např. světelným zářením, elektrickým výbojem nebo také chemickou reakcí) dosáhneme toho, že na vyšší energetické hladině bude více elektronů než na nižší. Tento stav se nazývá inverzní obsazení (populace) hladin.
- Kladná zpětná vazba - zajišťuje, že část generovaných fotonů zůstává v aktivním prostředí a ty pak dále stimulují přechody elektronů. Tato vazba vznikne vložením aktivního prostředí do rezonátoru (nejčastěji používaným rezonátorem je Fabry - Perotův), který je tvořen dvěma rovinnými zrcadly. Jedno z nich je odrazivé a druhé polopropustné. Obě zrcadla jsou umístěna rovnoběžně proti sobě. Jakmile se foton několika odrazy zesílí nad určitou úroveň, projde přes polopropustné zrcadlo ven a vzniká tak laserové záření [1], [7].

1.3 Materiály laserů

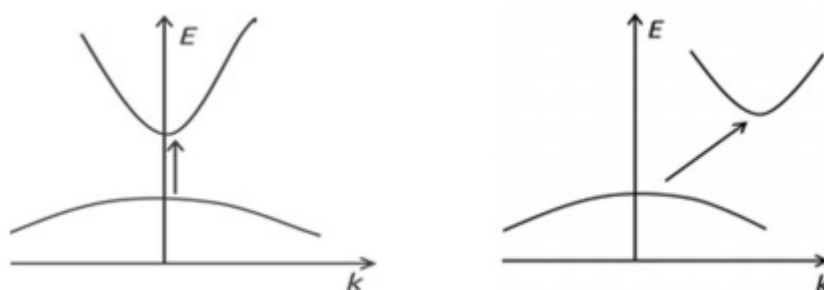
Podle materiálu aktivního prostředí lze lasery zařadit do několika kategorií:

- Pevnolátkové lasery (např. rubínový, neodymový)
- Plynové lasery (např. helium-neonový, CO₂)
- Kapalinové lasery (např. rhodamin 6G)
- Polovodičové lasery (např. GaAs, InP)

V této práci bude popsána pouze skupina polovodičových laserů, které dále můžeme rozdělit podle obsažených látek do tří podskupin:

1. Prvky IV. skupiny periodické soustavy prvků, kam patří germanium Ge a křemík Si.
2. Polovodiče podobné diamantu - skupina $A^{III}B^V$, kde se spojují prvky III. skupiny periodické soustavy prvků (Al, Ga, In) s prvky V. skupiny (P, As, Sb). Nejběžnějšími polovodiči jsou GaAs, InSb, GaP, InP.
3. Sloučeniny typu $A^{IV}B^{VI}$. Příkladem takových polovodičů jsou např. PbS, PbSe, GeTe [8].

Další možné dělení polovodičových laserů je dle pásové struktury. Rozlišujeme polovodiče přímé (např. GaAs) a nepřímé (např. Si) viz obr. 1.3. U přímých polovodičů, neboli u polovodičů s přímým zakázaným pásem, leží vrchol valenčního a dno vodivostního pásu proti sobě. Pravděpodobnost zářivé rekombinace je o mnoho řádů vyšší, než u polovodičů s nepřímým zakázaným pásem.



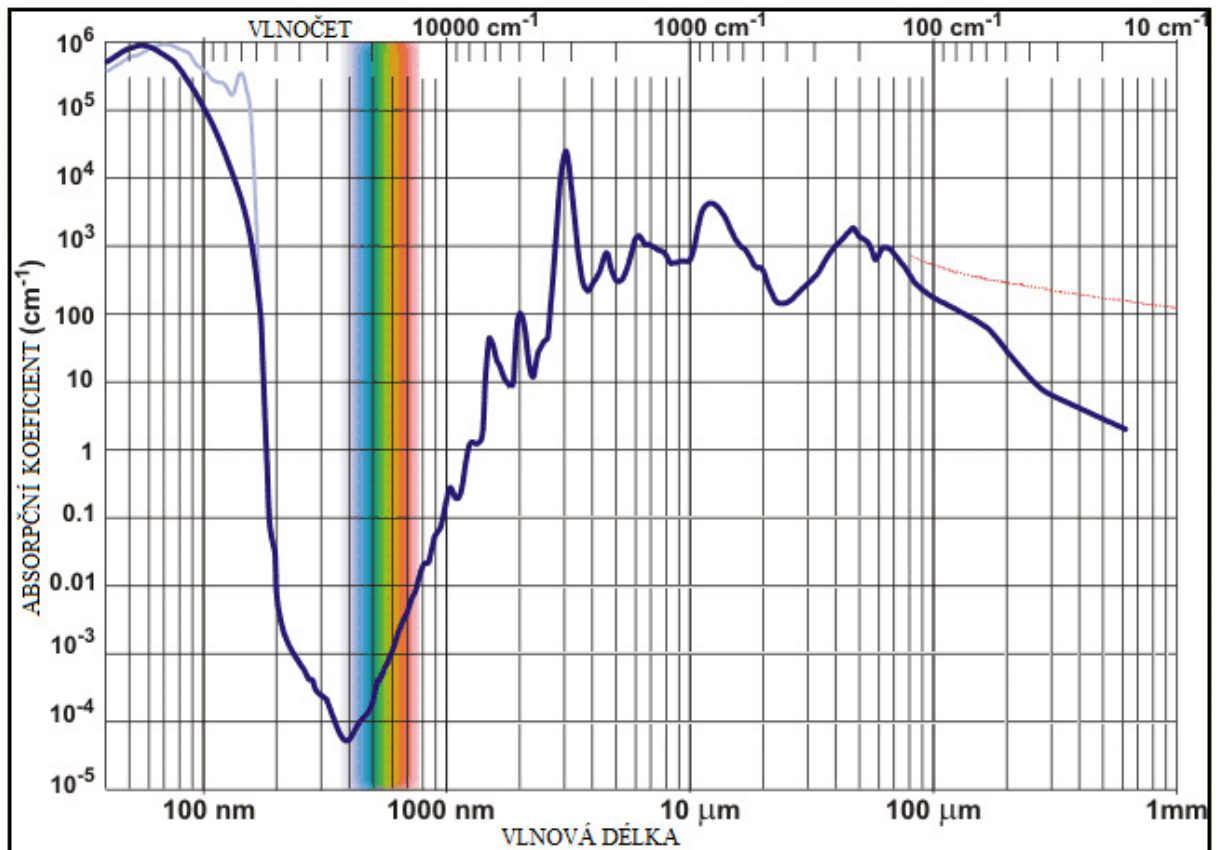
Obr. 1.3: Přímý a nepřímý zakázaný pás polovodičů [4].

Přechod z vodivostního do valenčního pásu u nepřímých polovodičů vyžaduje změnu hybnosti, při které téměř nedochází k emisi fotonů. Pravděpodobnost zářivé rekombinace je tedy podstatně nižší [9].

1.4 Útlum světla v prostředí

Průchodem světla hmotným prostředím dojde k pohlcení části světelné energie a další část se rozptýlí. Tím dochází ke zmenšení intenzity záření - útlumu. Při volbě vhodných parametrů zdroje laserového paprsku je třeba brát v úvahu útlum paprsku v daném prostředí. Vzhledem k použití laseru v aplikaci s parní turbínou (viz kapitola 1.7) bude tato kapitola zaměřena na prostředí vodní páry.

Je třeba zvolit vhodnou vlnovou délku zdroje, aby byl paprsek při průchodu prostředím co nejméně utlumen. Při výběru vlnové délky musí být respektován i index lomu na rozhraní vody a páry. Charakteristika absorpce světelného záření ve vodě v závislosti na vlnové délce je zobrazena na obr 1.4.



Obr. 1.4: Absorpce světelného záření ve vodě v závislosti na vlnové délce. Upraveno z [21].

Útlum paprsku roste přibližně exponenciálně s vlnovou délkou, naopak index lomu přibližně exponenciálně klesá s vlnovou délkou. Proto je třeba volit kompromis mezi malým útlumem paprsku a malým indexem lomu [20].

1.5 Druhy polovodičových laserových diod

Podle vnitřní struktury lze laserové diody rozdělit do několika skupin:

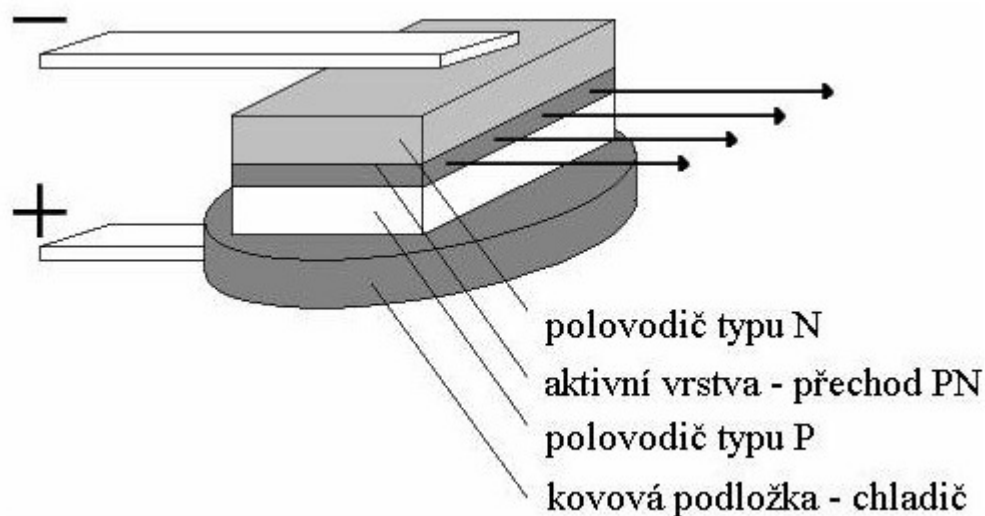
- Homostrukturní lasery (HoL)
- Heterostrukturní lasery (HL)
- Lasery s rozprostřenou zpětnou vazbou (DFBL)
- Lasery s kvantovými jámami (QWL)

Další možné dělení je podle místa vyzařování:

- Lasery hranově vyzařující (EEL)
- Lasery plošně vyzařující (VCSEL) [12]

1.5.1 Homostrukturní lasery (HoL)

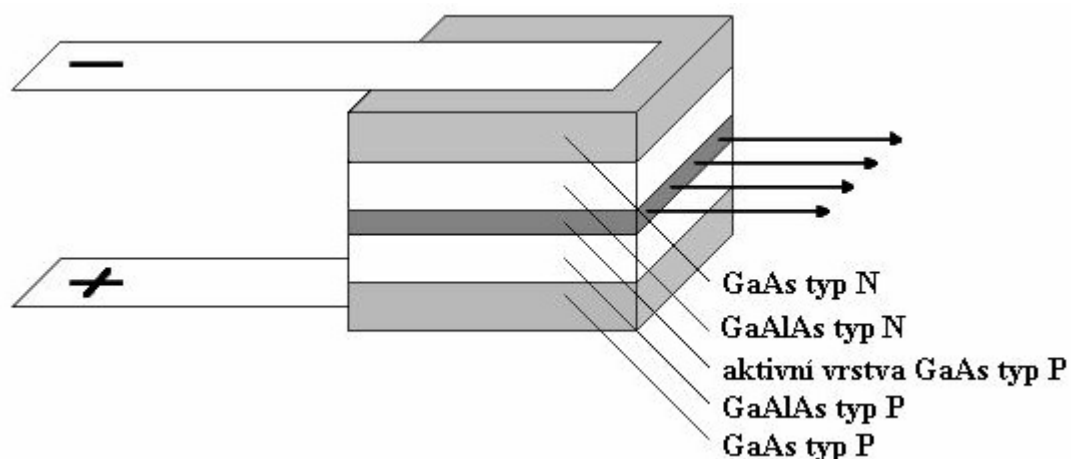
Díky tomuto typu laseru bylo poprvé dosaženo emise koherentního záření. Homostrukturní laser tvoří P-N přechod (obr. 1.5). Velká šířka aktivní oblasti (1-3 μm) pro silně dopovaný GaAs je určena difúzní délkou menšinových nosičů. Pro překonání aktivní oblasti jsou zapotřebí velké prahové hustoty proudů. Při generaci záření dochází ke ztrátám vlivem úniku záření do okolních vrstev. Z tohoto důvodu mají homostrukturní lasery malou účinnost. Další nevýhodou je nutnost chlazení během provozu. Tento typ proto nemá velké praktické využití [12].



Obr. 1.5: Homostrukturní laser [12].

1.5.2 Heterostrukturní lasery (HL)

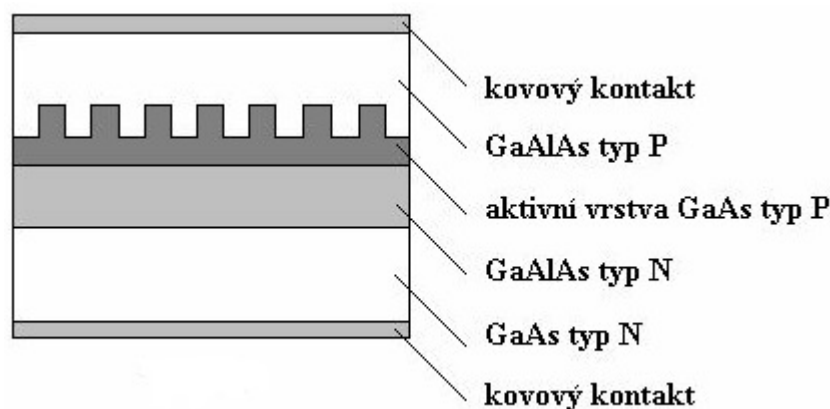
Heteropřechod je rozhraní polovodivých materiálů, které na sebe plynule navazují na úrovni krystalové mřížky [13]. Vymezení vlnovodu je u tohoto typu dáno skokovou změnou indexu lomu v oblasti heteropřechodu. Současně s účinným vedením světla zajišťuje heterostruktura i účinné soustředění menšinových nosičů. Podle počtu heteropřechodů lze tento typ laserů rozdělit na lasery s jednou (single HL) nebo dvojitou (double HL) heterostrukturou (obr. 1.6). Tzv. proužková geometrie vede ke zmenšení plochy aktivní vrstvy, čímž je dosaženo nižší hodnoty proudových hustot asi na pětinovou hodnotu oproti homostrukturním laserům. HL dosahují také vyšší účinnosti, a to kolem 75% [12].



Obr. 1.6: Heterostrukturní laser s dvojitou heterostrukturou (DHL) [12].

1.5.3 Lasery s rozprostřenou zpětnou vazbou (DFBL)

U tohoto typu laseru (obr 1.7) není rezonátor tvořen zrcadly, ale pomocí difrakčních mřížek. Tato mřížka je naleptána těsně u aktivní vrstvy a plní funkci rezonátoru. Dochází zde k periodické změně indexu lomu ve směru šíření. Pro omezení odrazů je povrch krystalu pokryt antireflexní vrstvou. DFB lasery dosahují úzké spektrální šířky pod 1nm. Pro jejich snadnou výrobu a slučitelnost s planárními vlnovody se používají v mnoha aplikacích. Nejčastějším použitím je přenos informací optickým vláknem, typicky pro $\lambda = 1300$ nm a $\lambda = 1550$ nm [12], [14].



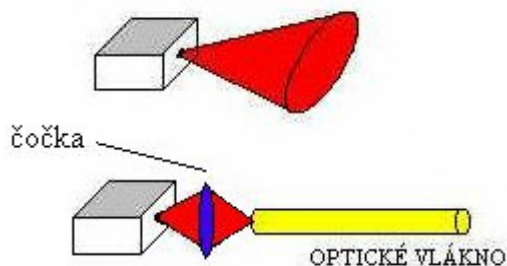
Obr. 1.7: Laser s rozprostřenou zpětnou vazbou [12].

1.5.4 Lasery s kvantovými jámami (QWL)

Tento typ obsahuje také dvojitou heterostrukturu (obr. 1.6) s tím rozdílem, že jeho aktivní vrstva je velice tenká a při generování optického záření se uplatňují kvantové jevy v závislosti na její šířce. Elektron může nabývat pouze určitých energií odpovídajících vlnovým délkám, které jsou násobkem miniaturních rozměrů aktivní vrstvy. Současné technologie umožňují výrobu laserů s tloušťkou kvantové jámy okolo 10nm. Prahové proudy se pohybují od desetin po několik desítek mA. Teplotní závislost prahového proudu QW laserů je přijatelnější než u předchozích typů. Účinnost se pohybuje kolem 80% [15].

1.5.5 Lasery hranově vyzařující (EEL)

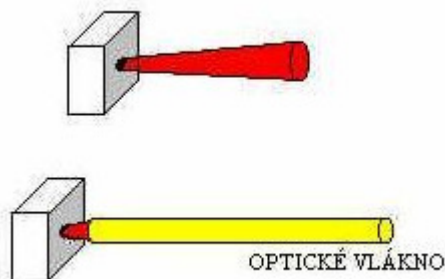
Světelný paprsek u tohoto typu laseru je vyzařován z hrany přechodu (obr. 1.8). Tento typ je stále velice využívanou formou polovodičových laserů. EEL dosahují vysoké účinnosti [15].



Obr. 1.8: Hranově vyzařující laser [12].

1.5.6 Lasery plošně vyzařující (VCSEL)

Emitují světelné záření z plochy součástky, která je rovnoběžná s rovinou přechodu. Toto záření by při použití běžného substrátu bylo pohlceno, proto se využívá transparentního substrátu a záření se může odrazit od kovového kontaktu. Tento typ dosahuje vyšší účinnosti než hranově vyzařující lasery. Důležitá vlastnost tohoto laseru je malá rozbíhavost výstupního paprsku, proto je lze navázat do optického vlákna bez použití přídavných komponent, jako jsou optické čočky. Z tohoto důvodu se hojně využívají u vláknových komunikačních systémů, zejména jedno-vidových vláken [12].



Obr. 1.9: Plošně vyzařující laser [12].

1.6 Vlastnosti a možnosti použití polovodičových laserových diod

Prudký rozvoj laserů v posledních letech rozšířil i pole jejich působnosti. Neustále dochází k jejich zdokonalování, a tím roste i jejich význam.

V současnosti existují lasery různých vlnových délek emitovaného záření, které zasahují jak do viditelné, infračervené tak i ultrafialové oblasti záření. Nejběžněji dostupné jsou lasery s vlnovou délkou kolem 700 nm, což odpovídá červené barvě. Jejich výkony se pohybují v širokém rozmezí od hodnot menších než mikrowatt až do petawattů¹ (10^{15} W). Ceny laserů jsou poměrně vysoké. Samostatná laserová dioda stojí od stovek Kč do jednotek tisíců. Bližší představu o parametrech a cenách laserových diod, ale i jejich modulech je možné si udělat po přečtení 3. kapitoly.

Polovodičové laserové diody vyzařují na rozdíl od jiných zdrojů světla koherentně, což znamená, že mají velmi malou rozbíhavost paprsku. Tento paprsek je monochromatický, tvořený pouze jednou barvou, tedy jednou vlnovou délkou. Další výhodnou vlastností je relativně vysoká účinnost těchto zdrojů, v porovnání s jinými typy laserů. Např. argon iontové lasery mají velice nízkou účinnost 0,1% nebo CO₂ lasery dosahují účinnosti kolem 30%. Jsou také levnější, menší a konstrukčně jednodušší. Výhodou je také spektrální přeladění v omezeném pásmu (ve vlnových délkách 0,3 μm – 30 μm).

Jednou z nevýhod je rozbíhavost generovaného paprsku závislá na teplotě aktivního materiálu [30]. Další nevýhoda je citlivost laseru na elektromagnetické rušení. Vystavíme-li laserovou diodu tomuto rušení, může dojít k jejímu okamžitému zničení nebo k degradaci jejích vlastností. Druhá varianta představuje vyšší riziko, protože laser na první pohled pracuje správně [35]. Při provozu také dochází k ohřívání laseru, a proto je důležité jeho chlazení.

Obecné využití laserů je obrovské a nebylo by možné popsat všechny obory, ve kterých se lasery uplatňují. Proto zde jen velice stručně uvedu některá odvětví, ve kterých se můžeme s lasery setkat.

Lasery se využívají v průmyslu např. k řezání, vrtání, svařování a jinému obrábění materiálů. Výhodou je bezkontaktní opracování předmětů. Jiný obor, který využívá lasery je vojenství. Zde je možné laserově zaměřovat cíle, počítat vzdálenosti apod. Dalším velice důležitým oborem je medicína, kde použití laserů stále více narůstá. Zprvu se lasery využívaly

¹ Pro velkou energetickou náročnost se tento výkon omezuje na velmi krátkou dobu. Vyskytuje se v pulzech trvajících řádově 10^{-12} s. [18]

především v očním lékařství pro operování sítnice. Dnes se aplikují v diagnostice i léčení nemocí, chirurgických zákrocích, ale i v dermatologii nebo pro nejrůznější kosmetické úpravy. V telekomunikacích se využívají např., jak již bylo výše zmíněno (kap. 1.5.3), pro přenos informací optickým vláknem [16]. S laserem se lze setkat i v běžném každodenním životě jako jsou např. laserová ukazovátka, čtečky čárových kódů, tiskárny, počítačové myši nebo CD/DVD/Blu-Ray mechaniky.

1.7 Monitorování lopatek parních turbín

Další možný způsob využití laseru je při monitorování lopatek parní turbíny a následném měření jejich vibrací. Stále více využívané v parních turbínách jsou lopatky s bandáží či vazbou. V roce 2006 firma Doosan Škoda Power vyvinula nový typ lopatky o délce 1200mm (původní měřila 552mm). Dlouhá oběžná lopatka zvyšuje účinnost turbíny. Dalším pozitivem je, že při jejím použití se zkrátí celková délka rotoru turbíny, a tím dojde k velké úspoře výrobních a stavebních materiálů. Více informací a technické zajímavosti lopatky lze najít v [19a], [19b].

Během činnosti parních turbín působí na jejich lopatky vibrace. Tento nežádoucí pohyb ovlivňuje jejich životnost a výkon. K identifikaci povahy vibračních jevů, ale i ke sledování úrovně odezvy se využívá měřicí systém. Dřívější systémy využívaly snímač mechanicky připevněný k rotujícím lopatkám. Nyní se obrací pozornost k laserovým měřicím systémům, které snímají bezkontaktně. Tyto moderní systémy podávají za provozu informace o namáhání lopatek, jejich poškození a zbytkové životnosti. Tím snižují možné riziko havarijních stavů [32].

Novodobé metody monitorování bandážovaných lopatek (např. blade tip timing - BTT) jsou založeny na optickém snímání, které poskytuje vysoké rozlišení. BTT je metoda, která se využívá ke stanovení dynamického namáhání lopatek parních turbín. Využívá několik optických sond umístěných v malé vzdálenosti kolem statoru parní turbíny a snímá tak každou lopatku procházející před sondou. Sondou je laserová dioda, která slouží jako zdroj světelného záření. Generovaný světelný paprsek se od turbíny odráží, následně je snímán a zpracováván. Porovnává se skutečný čas průchodu lopatky před sondou s časem vypočteným, kdy měla lopatka projít ideálně. Rozdíl těchto časů udává dislokaci lopatek při každém oběhu turbíny. Analýzou naměřených dat lze získat amplitudu a frekvenci vibrací jednotlivých lopatek. Pokud by k vibracím nedocházelo, závisel by pohyb lopatky pouze na obvodové rychlosti turbíny. Vzhledem k vysokým rychlostem turbín – 3000 ot/min lopatky vibrují vždy. Pohyb

tedy závisí navíc na amplitudě a frekvenci těchto vibrací. Získáním těchto informací je možné zabránit rozsáhlým haváriím parních turbín a tím ušetřit nemalé finanční prostředky. Proto je důležité znát tyto údaje [26], [37].

1.8 Bezpečnost práce

Při používání laserů je nutné dodržovat určité bezpečnostní požadavky, které ukládá nařízení vlády č.1/2008 Sb., o ochraně zdraví před neionizujícím zářením. Toto nařízení specifikuje ochranu zdraví zaměstnanců před nepříznivými vlivy optického záření.

Laserové záření působící na lidský organismus může způsobit různý stupeň jeho poškození. Největší nebezpečí představuje pro oči, kde může způsobit trvalé poškození zraku. Menší nebezpečí hrozí pro kůži. Maximální přípustná dávka ozáření (MPE – maximum permissible exposure) je maximální úroveň laserového záření, kterému může být vystaven člověk, aniž by na něm ozáření zanechalo následky. Úrovně MPE se vztahují k vlnové délce záření, délce impulzu, době trvání ozáření, typu ozářené tkáně atd. Z hlediska nepříznivých účinků na zdraví lze zařadit laserová zařízení do tříd podle ČSN EN 60825-1:2007.

Třída 1: Tato zařízení jsou zcela bezpečná během používání. Patří sem lasery všech vlnových délek a i vysokovýkonné lasery, které jsou zcela zakrytovány. Při otevření krytu se laser vypne. Záření z laseru se ven vůbec nedostává nebo je tak utlumené, že je možné trvale sledovat přímý světelný svazek.

Třída 2: Kontinuální lasery emitující záření ve viditelné oblasti s výkonem pod 1 mW. Přímý pohled do svazku je možný, oko je chráněno důsledkem mrkacího reflexu nebo otočením hlavy. Při záměrném dlouhotrvajícím pohledu do svazku není vyloučeno poškození zraku.

Třída 3: a) Kontinuální lasery s výkonem nižším než 5 mW. Oko může být poškozeno při pohledu do svazku za použití lupy či dalekohledu. Použití těchto laserů by mělo být pouze tam, kde je nepravděpodobný přímý pohled do svazku.

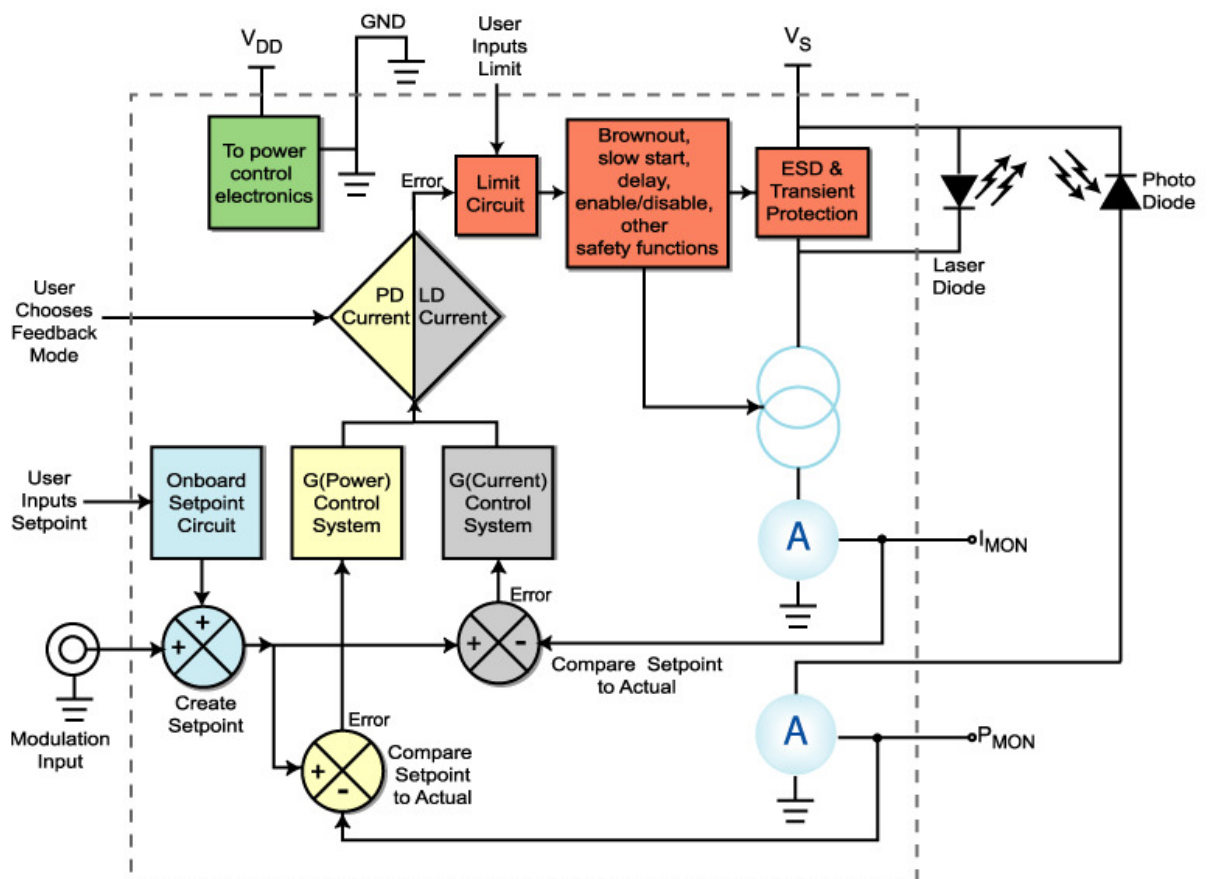
b) Kontinuální lasery s výkonem od 5 mW do 500 mW. Hrozí nebezpečí i při nahodilém pohledu do svazku. Je proto nutné používat ochranné pomůcky i při pozorování světelných odrazů.

Třída 4: Do této skupiny patří všechny lasery s výkonem nad 500 mW. Hrozí vážné nebezpečí poškození oka a ozářené pokožky. Je proto nutné používat ochranné pomůcky i při pozorování světelných odrazů. Tyto lasery představují i nebezpečí vzniku požáru [10], [11].

2 Možnosti napájení laserů

K napájení laserové diody lze s výhodou použít zdroj proudu. Důvodem je, že laserové diody (LD) mají nízkou dynamickou impedanci v lineární části voltampérové charakteristiky. Proudový zdroj má dostatečně velkou výstupní impedanci a dodává tak konstantní proud i při změně zátěže. Velice důležité je, aby byl napájecí zdroj doplněn o další pomocné obvody, které slouží k ochraně LD před zničením [22], [23].

Blokový diagram na obr. 2.1 zobrazuje řídicí obvod laserových diod, někdy také nazývaný napájecí zdroj LD nebo laserový driver.



Obr. 2.1: Blokový diagram řídicího obvodu LD [23].

K nastavení konstantního optického výkonu se používá fotodioda, někdy je přímo integrovaná v pouzdře LD. Nejčastěji používanou fotodiodou je PIN dioda. Tato dioda snímá okamžitý generovaný výkon, dále monitoruje velikost procházejícího proudu a zavedením zpětné vazby ovlivňuje proud procházející laserovou diodou, který nastavuje požadovaný výstupní výkon.

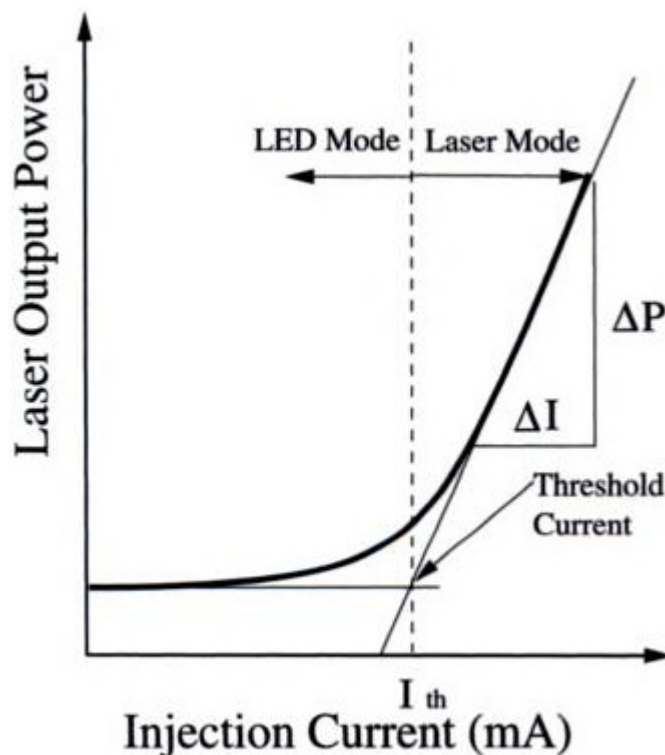
Uživatel může nastavovat 2 režimy řízení – řízení konstantního výkonu (žluté bloky), nebo konstantního proudu (šedé bloky). K nastavení konstantního optického výkonu se používá monitorovací fotodioda. Ampérmetry měří proud procházející laserovou diodou (IMON) nebo fotodiodou (PMON). Dále je možné nastavit limitní hodnotu proudu nebo připojit modulační signál. Červené bloky označují ochranné prvky jako omezovače proudu, ochrana proti ESD², ochrana proti přechodným jevům atd. Modré bloky slouží k uživatelskému nastavení.

Důležitá je ochrana LD před napětím převyšujícím 1V v závěrném směru jak při kontinuálním, tak pulzním režimu. Proto se k LD připojuje antiparalelně rychlá ochranná dioda. Při provozu se musí také dbát na odvod tepla, zejména u kontinuálně pracujících laserů. Laserová dioda se velmi rychle ohřívá, snižuje svůj odpor, tím se zvyšuje procházející proud a mohlo by dojít ke zničení v důsledku kladné zpětné vazby. Dalším nebezpečím jsou krátkodobé přechodné jevy způsobené spínáním a vypínáním zdroje. Řešením tohoto problému je použití obvodu s pomalým náběhem, který svým zpožděním omezí proudové špičky po zapnutí zdroje. Naopak při vypnutí je třeba LD odpojit pomocí paralelně zapojeného relé nebo FET tranzistoru [22], [23], [33].

² Při práci s LD je nutné dodržovat předpisy ESD, jinak hrozí snadné zničení těchto součástek. Např. už při vyjmutí z obalu od dodavatele.

2.1 Parametry laserů

- Prahový proud I_{th} [mA]: Prahový proud je nejdůležitějším parametrem LD. Připojíme-li napájecí zdroj k laserové diodě a budeme zvyšovat proud v propustném směru, dojde z počátku k téměř lineárnímu nárůstu prahového proudu. LD se v této oblasti chová jako LED dioda. Při dosažení hodnoty prahového proudu prudce naroste výkon záření, LD přechází z režimu spontánní emise do režimu stimulované emise a začíná emitovat koherentní záření. Tato charakteristika je zobrazena na obr. 2.2. Nízká hodnota prahového proudu je známkou kvality laserové diody. U kvalitních LD se hodnoty I_p pohybují v řádu jednotek mA. Tento parametr je teplotně závislý, s rostoucí teplotou prahový proud vzrůstá [24].
- Výstupní výkon P_{th} [μ W]: Dalším důležitým parametrem je výstupní výkon LD. Následující obr. 2.2 zobrazuje výstupní optický výkon v závislosti na proudu v propustném směru.



Obr. 2.2: Výstupní optický výkon v závislosti na proudu v propustném směru. Přejato z [31].

- Diferenciální účinnost η_f [mW/A] – ovlivňuje intenzitu vyzářeného světla s přírůstkem proudu. Vypočítá se dle rovnice 2.1, jako podíl změny optického výkonu ku změně proudu.

$$\eta_f = dP / dI \quad [mW / A] \quad (2.1)$$

- Provozní teplota T [°C] – při této teplotě obvykle probíhají měření. LD se měří při pokojové teplotě, a pak při teplotě kolem 70 – 85°C.
- Napětí U_p [V] – napětí laserové diody v propustném směru při daném optickém výkonu. Hodnotu lze najít na V-A charakteristice a pohybuje se obvykle kolem 1 V.
- Napětí U_i [V] – napětí laserové diody v propustném směru při daném proudu např. 1mA. Malý proud se používá k testu správného zapojení pinů.
- Sériový odpor R_s [Ω] – sériový odpor diody v propustném směru se udává pro určitou hodnotu optického výkonu (např. 1,2 mW), daný vztahem 2.2.

$$R_s = U / I \quad [\Omega] \quad (2.2)$$

- Relaxační rezonanční frekvence f_r [Hz] – souvisí přímo s maximální frekvencí, na které je možné LD modulovat, aniž by došlo ke zkreslení přenášeného signálu. Hodnota je úměrná odmocnině neprahového proudu, viz vztah 2.3, kde I je proud procházející laserovou diodou a I_p je prahový proud.

$$f_r \approx \sqrt{I - I_p} \quad [Hz] \quad (2.3)$$

[24], [27]

2.2 Režimy laserů

Dle režimu generování délky impulzu je možné rozdělit lasery do dvou skupin:

2.2.1 Kontinuální

Spojité režim, kdy laser vyzařuje nepřetržitě po dobu delší než $2,5 \cdot 10^{-1}$ s [25]. Přednosti kontinuálního režimu laseru spočívají ve vyšší účinnosti, než které dosahují impulzní lasery. Dále jsou jednodušší, stabilnější a levnější.

2.2.2 Impulzní

K získání impulzního režimu neboli impulzů záření kratších než $2,5 \cdot 10^{-1}$ s, je možné použít kontinuální laser s externí uzávěrkou (modulátorem), která propouští světelné záření jen během krátkého časového intervalu. Tento režim má některé nedostatky. Prvním je nízká účinnost, jelikož dochází k blokování vyzařované energie mezi jednotlivými impulzy. Druhým nedostatkem je, že špičkový výkon nemůže přesáhnout hodnotu stálého výkonu kontinuálního laseru. Dalšími jsou složitost těchto zařízení, jejich cena a potřeba speciální řídicí elektroniky.

Jinou možností získání impulzů je spínání laseru pomocí vnitřní modulace. Energie, která se nashromáždí v době mezi pulzy, je pak během pulzu vyzářena. Hromadění energie je možné buď v rezonátoru (světlo), nebo v atomárním systému (inverzní obsazení). Tyto způsoby umožňují generovat krátké impulzy se špičkovým výkonem vyšším, než u kontinuálních laserů. Jedná se tedy o účinnější metodu.

Nejčastěji se však využívá metoda spínání zisku, která je založena na kontrolovaném zapínání a vypínání čerpání. Tímto režimem lze snadno modulovat čerpací elektrický proud. Je možné dosáhnout modulační frekvence kolem 2,5 GHz [22].

3 Nabídka laserů na trhu

Nabídka laserových diod se v posledních letech velmi rozrostla. Díky stále širšímu využívání laserů dochází k neustálému poklesu jejich ceny. Laserové diody se prodávají buďto jako samostatné součástky nebo mohou mít ve svém pouzdře monitorovací fotodiody. Existují také tzv. moduly laserových diod, které mohou obsahovat kolimační čočky i fotodiody. Navíc ještě v sobě mohou obsahovat zabudovanou elektroniku pro připojení modulačního signálu, ochranu proti přepólování, stabilizaci diody aj.

Při průzkumu laserových diod a modulů na českém, ale i zahraničním trhu byly stanoveny mezní parametry. Prvním omezením se stalo rozmezí cen. Horní hranici jsem zvolil 10 tisíc Kč za diodu či modul. Ne všichni výrobci či dodavatelé však uvádí ceny přímo na svých portálech. I přes kontaktování pověřených osob, se mi nepodařilo zjistit některé ceny či parametry diod a modulů. Vlnová délka byla volena s ohledem na nízký útlum v prostředí vodní páry, a to v mezích $\lambda = 300 - 532$ nm.

Následující tabulka (Tab. 1) zobrazuje nabídku dostupných laserových diod, seřazených dle vzestupné vlnové délky. Nejprodávanější v tomto ohledu jsou LD s vlnovou délkou 405 nm. V této tabulce nejsou uvedeny obchody jako TME, Mouser, Farnell a EZK, které sice laserové diody nabízejí, ale ne s požadovaným rozmezím vlnových délek. Nabídka LD v těchto obchodech se pohybuje od 635 nm a výše.

Laserové diody	vlnová délka	výkon	cena	pouzdro	prahový proud	pracovní napětí	dostupné z
DL-405-0.14	405 nm	140 mW	4 599 Kč	TO-18	35 mA	4,6 V	http://cz.rs-online.com/
DL-405-0.10	405 nm	100 mW	1 837 Kč	TO-18	35 mA	4,6 V	http://cz.rs-online.com/
DL-4146-301S	405 nm	20 mW	39 \$	TO-18	26 mA	4,8 V	http://www.prophotonix.com/
Nichia LD	405 nm	120 mW	140 \$	TO-18	150 mA	5 V	http://www.aixiz.com/
Nichia LD	405 nm	20 mW	22 \$	TO-18	17 mA	4,5 V	http://www.aixiz.com/
CP-40X-PLR40	405 nm	40 mW	345 \$	TO	30 mA	5,4 V	http://www.ondax.com/
FOLD-12S-405-VBG	405 nm	12 mW		TO (9mm)	30 mA	5,4 V	http://www.frlaserco.com/
WSLD-445-050m-1	445 nm	* 100 mW	60 \$	TO (3,8 mm)	30 mA	5,5 V	http://www.wavespectrum-laser.com/
PL 450B	450 nm	80 mW	2 107 Kč	TO-38	30 mA	5,8 V	http://cz.rs-online.com/
LD-450-100SG	450 nm	100 mW	104 \$	TO-38	30 mA	5,8 V	http://www.roithner-laser.com/
Osram LD	450 nm	1,4 W	85 \$	TO-56			http://www.aixiz.com/
LD-520-50SG	520 nm	50 mW	319 \$	TO-38	60 mA	7,3 V	http://www.roithner-laser.com/
F-LASER GREEN 5MW	532 nm	5 mW	532 Kč	-	110 mA	3 V	http://www.gme.cz/

* nový upgrade z 50 mW na 100 mW

Tab. 1: Nabídka dostupných LD.³

³ Vzhledem k velikosti tabulky jsou v posledním sloupci uvedeny pouze stránky obchodů. V příloze na CD bude původní tabulka přímo s odkazem na danou laserovou diodu a také pdf s katalogovým listem.

V další tabulce (Tab. 2) je zobrazena nabídka laserových diod, které mají v pouzdře monitorovací fotodiodu. Typ pouzdra je nejčastěji tří-vývodový TO-18. Opět je seznam seřazen podle vzestupné vlnové délky. Nejčteněji je zastoupená skupina s vlnovou délkou $\lambda = 405$ nm. Pouze LD s PD pod označením WSLD-405-020m-1-PD je možné zakoupit v minimálním množství 10ks.

V pořadí třetí tabulka (Tab. 3) zobrazuje nabídku laserových modulů, seřazenou podle vzestupné vlnové délky. Nyní je nejvíce zastoupena skupina modulů s vlnovou délkou $\lambda = 532$ nm. Laserové moduly nabízí víc obchodů, než je zde uvedeno. Jedná se např. o Conrad, Farnell a RS. Důvodem nezařazení do tabulky je cena těchto modulů, která se pohybuje v rozmezí od 12 tis. (Farnell), až do 44 tis. (Conrad).

V následující tabulce (Tab. 4) je nabídka fotodiod sloužících jako detektory záření dané vlnové délky. Tato tabulka zobrazuje pouze malou část dostupných fotodiod. Důvodem je široká nabídka většiny obchodů, jako jsou např. Roithner, Lasercomponents, Digikey, RS, TME. Obchody nabízející fotodiody, které svými parametry nevyhovují stanoveným mezím, jsou Farnell a GME.

Poslední tabulka (Tab. 5) znázorňuje nabídku pigtailových laserových diod, které jsou vhodné k připojení na optické vlákno. Podařilo se mi najít několik obchodů, které nabízí tyto LD. V tabulce je uveden pouze Wavespectrum, protože Prophotonic, Newport a další nevyhovují vlnovými délkami (nad $\lambda_{\text{MIN}} = 635$ nm) a Thorlabs cenou (nad 600 \$). Ani jeden obchod s pigtailovými diodami však není tuzemský.

Při srovnání dostupnosti laserových komponentů u českých a zahraničních obchodů byly znatelné obrovské rozdíly. Zahraniční trh nabízí mnohem širší množství laserů nejrůznějších vlnových délek. Jejich běžné rozmezí se pohybuje od 375 nm do 1550 nm. Nabízí také rozsáhlejší katalogové listy, ve kterých mimo základních parametrů uvádí též některé odměřené charakteristiky. Přijatelnější jsou také cenové relace zahraničních obchodů.

LD s PD	vlnová délka	výkon	cena	pouzdro	prahový proud	pracovní napětí	dostupné z
FVLD-70S-375	375 nm	70 mW		TO-18	50 mA	5,4 V	http://www.frlaserco.com/
FVLD-120S-395	395 nm	120 mW		TO-18	28 mA	4,5 V	http://www.frlaserco.com/
LD405P20	405 nm	20 mW	530 Kč	TO-18	25 mA	4,1 V	http://laser-shop.cz/
CS4050205M	405 nm	20 mW	111 €	TO-18	26 mA	4,8 V	http://www.lasercomponents.com/
CS405035M5M	405 nm	35 mW	128 €	TO (5,6mm)	38 mA	4,8 V	http://www.lasercomponents.com/
NV4V31SF-A	405 nm	175 mW	500 \$	TO-18	35 mA	5 V	http://www.digikey.com/
D405-20	405 nm	20 mW	45 \$	TO-18	25 mA	5 V	http://www.digikey.com/
D405-120	405 nm	120 mW	90 \$	TO-18	35 mA	4,8 V	http://www.digikey.com/
WSLD-405-020m-1-PD	405 nm	10 mW	22 \$ (10ks)	TO-18	26 mA	4,8 V	http://www.wavespectrum-laser.com/
DL5146-101S	405 nm	40 mW	79 \$	TO-18	35 mA	5,2 V	http://www.thorlabs.de/
DL-405-0.02	405 nm	20 mW	817 Kč	TO-18	25 mA	4,8 V	http://cz.rs-online.com/
FVLD-100S-473	473 nm	100 mW		TO -56	20 mA	5,7 V	http://www.frlaserco.com/
FVLD-80S-515	515 nm	80 mW		TO -56	60 mA	6,5 V	http://www.frlaserco.com/

Tab. 2: Nabídka dostupných LD s monitorovací fotodiodou.⁴

⁴ Vzhledem k velikosti tabulky jsou v posledním sloupci uvedeny pouze stránky obchodů. V příloze na CD bude původní tabulka přímo s odkazem na danou laserovou diodu a také pdf s katalogovým listem.

Laserové moduly	vlnová délka	výkon	cena	optika	modulace	napájení	dostupné z
LD modul	405 nm	80 mW	1 718 Kč	ANO	TTL	12 V AC/DC	http://laser-shop.cz/
LD modul	405 nm	50, 100, 150 mW		ANO	-	100 - 230 V AC	http://www.alphalaser.com/
FOLM-405-6-FC	405 nm	6 mW		-	TTL, analog	5 V DC	http://www.frlaserco.com/
FSDL-442-XXX-LM	442 nm	100 - 800 mW		-	TTL	85-250 V AC, 5 V DC	http://www.frlaserco.com/
LD modul	445 nm	300 mW	4 780 Kč	ANO	TTL	12 V AC/DC	http://laser-shop.cz/
Spot laser module	445 nm	80 mW	61 \$	-	-	5 V DC	http://www.aixiz.com/
Adjustable laser module	445 nm	1 W	210 \$	ANO	Analog	12 V DC	http://www.aixiz.com/
HQML3-473	473 nm	40 mW		-	-	12 V DC	http://www.frlaserco.com/
VLM-532-43-SCB	532 nm	10 mW	182 \$	-	-	2,7V DC	http://www.digikey.com/
HLG-20	532 nm	20 mW		ANO	-	6 -12 V DC	http://www.electronlaser.com/
SL-532nm-GLM-012	532 nm	2,5 mW		ANO	-	3 V DC	http://www.bealasers.com/
FP-D-532-10-C-F	532 nm	10 mW		ANO	-	5 - 30 V DC	http://www.lasercomponents.com/
FP-L-532-4-50-C	532 nm	4 mW		ANO	-	5 - 30 V DC	http://www.lasercomponents.com/
HLDPM12-532-5	532 nm	5 mW	3 287 Kč	ANO	-	3V DC	http://www.tme.eu/
VLM-532-43-SCB-ND	532 nm	10 mW	5 880 Kč	-	-	3V DC	http://www.tme.eu/

Tab. 3: Nabídka dostupných modulů.⁵

⁵ Vzhledem k velikosti tabulky jsou v posledním sloupci uvedeny pouze stránky obchodů. V příloze na CD bude původní tabulka přímo s odkazem na danou laserovou diodu a také pdf s katalogovým listem.

Fotodiody	vlnová délka	cena	pouzdro	vývody	materiál	dostupné z
PD-FGAP71	150 - 550 nm	86 \$	TO-39	radiální	GaP	http://www.thorlabs.de/
FDS-010	200 - 1100 nm	42 \$	TO-5	radiální	Si	http://www.thorlabs.de/
FDS-100	350 - 1100 nm	13 \$	TO-5	radiální	Si	http://www.thorlabs.de/
(PIN) SFH 2400	380 -1100 nm	31 Kč	-	smd		http://www.conrad.cz/
(PIN) BP 104 S	400 -1100 nm	25 Kč	-	smd		http://www.conrad.cz/
PD333-3C/HO/L2	400 -1200 nm	13 Kč	5 mm	radiální		http://www.conrad.cz/
EPD-470-1/0.9	420 - 520 nm	8,15 €	1206	smd	GaP	http://www.roithner-laser.com/
EPD-470-0-1.4	420 - 520 nm	31,90 €	TO-18	radiální	GaP	http://www.roithner-laser.com/
BPW21R	420 - 675 nm	355 Kč	TO-5	radiální	Si	http://www.tme.eu/
PR5001 – Dual PD	500 - 1000 nm	52 Kč	-	smd	Si	http://www.tme.eu/
VTB10-12	330 - 720 nm	133 Kč	TO-46	radiální	Si	http://www.tme.eu/

Tab. 4: Nabídka samostatných fotodiód.⁶

⁶ Vzhledem k velikosti tabulky jsou v posledním sloupci uvedeny pouze stránky obchodů. V příloze na CD bude původní tabulka přímo s odkazem na danou laserovou diodu a také pdf s katalogovým listem.

Pigtailové laserové diody	vlnová délka	výkon	PD	pouzdro	fibre mode	jádro	délka vlákna	konektor	prahový proud	pracovní napětí
WSLP-375-040m-4, PM	375 nm	40 mW	-	koaxiální	UV - SM, PM	3 - 4 um	80 cm	FC/ST/SMA905	200 mA	4,4 V
WSLP-375-004m-4-PD, PM	375 nm	4 mW	PD	koaxiální	UV - SM, PM	3 - 4 um	80 cm	FC/ST/SMA905	40 mA	5,2 V
WSLP-375-012m-M-PD	375 nm	12 mW	PD	koaxiální	UV - MM	40,50,60,105 um	80 cm	FC/ST/SMA905	40 mA	5,2 V
WSLP-375-120m-M	375 nm	120 mW	-	koaxiální	UV - MM	40,50,60,105 um	80 cm	FC/ST/SMA905	200 mA	4,4 V
WSLP-405-015m-4	405 nm	15 mW	Opt. PD	koaxiální	SM	3 um	80 cm	FC/ST/SMA905	35 mA	4,6 V
WSLP-405-015m-PM	405 nm	15 mW	Opt. PD	koaxiální	UV - PM	3 um	80 cm	FC/ST/SMA905	35 mA	4,6 V
WSLP-405-050m-4	405 nm	50 mW	-	koaxiální	SM	3 um	80 cm	FC/ST/SMA905	35 mA	4,6 V
WSLP-405-050m-PM	405 nm	50 mW	-	koaxiální	UV - PM	3 um	80 cm	FC/ST/SMA905	35 mA	4,6 V
WSLP-405-100m-4, PM	405 nm	90 mW	Opt. PD	koaxiální	UV - SM, PM	3 um	80 cm	FC/ST/SMA905	35 mA	4,6 V
WSLP-445-015m-4, PM	445 nm	15 mW	-	koaxiální	UV - SM, PM	4 um	80 cm	FC/ST/SMA905	30 mA	5,5 V
WSLP-445-030m-4, PM	445 nm	25 mW	Opt. PD	koaxiální	UV - SM, PM	3 um	80 cm	FC/ST/SMA905	30 mA	5,5 V
WSLP-445-500m-M	445 nm	500 mW	-	koaxiální	UV - MM	40,50,60,105 um	80 cm	FC/ST/SMA905	200 mA	5 V
WSLP-473-004m-4-PD, PM	473 nm	4 mW	PD	koaxiální	UV - SM, PM	3 - 4 um	80 cm	FC/ST/SMA905	50 mA	5,5 V
WSLP-473-012m-M-PD	473 nm	12 mW	PD	koaxiální	UV - MM	40,50,60,105 um	80 cm	FC/ST/SMA905	50 mA	5,5 V
WSLP-488-012m-4-PD, PM	488 nm	12 mW	PD	koaxiální	UV - SM, PM	3 - 4 um	80 cm	FC/ST/SMA905	30 mA	5,6 V
WSLP-488-035m-M-PD	488 nm	35 mW	PD	koaxiální	UV - MM	40,50,60,105 um	80 cm	FC/ST/SMA905	30 mA	5,6 V

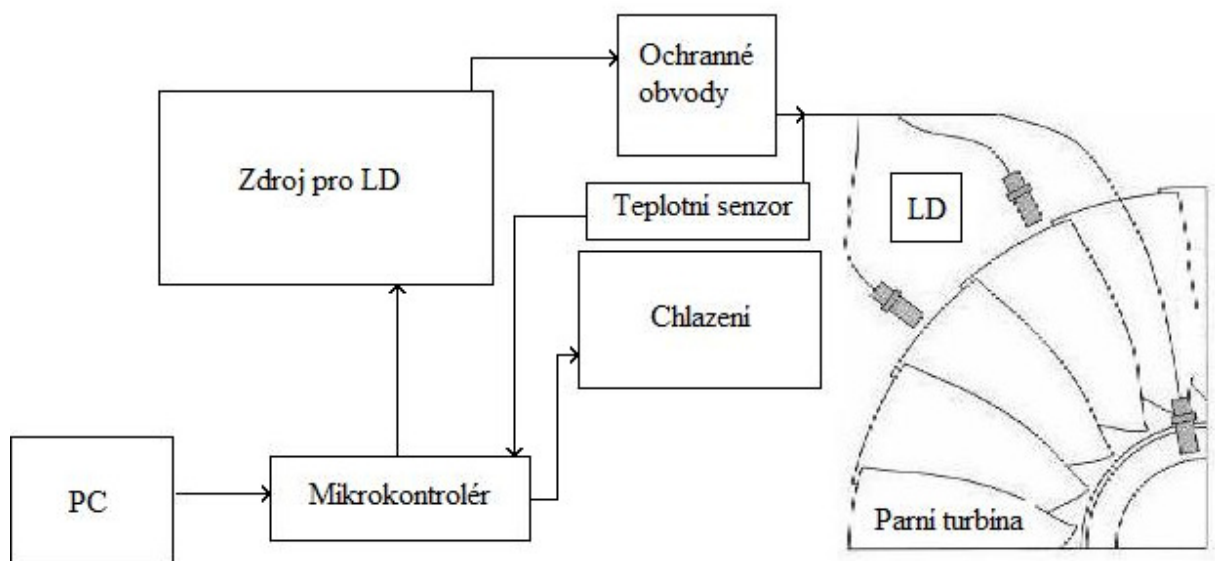
Tab. 5: Laserové diody vhodné k připojení na optické vlákno⁷

⁷ Vzhledem k velikosti tabulky zde nejsou uvedeny ani stránky obchodů, ve kterých je možné tyto součástky zakoupit. V příloze na CD bude původní tabulka přímo s odkazem na danou laserovou diodu a také pdf s katalogovým listem.

4 Návrh napájecího modulu s digitálním řízením

Tato kapitola je věnována vlastnímu návrhu napájecího modulu pro laserové diody s digitálním řízením. Nejprve zde bude zobrazeno blokové schéma (obr. 4.1) celého zapojení, a poté bude následovat popis jednotlivých bloků.

4.1 Blokové schéma



Obr. 4.1: Blokové schéma napájecího modulu pro LD při měření parních turbín.

4.2 Popis jednotlivých bloků

4.2.1 Laserová dioda

Jako zdroj laserového záření je použita laserová dioda. Z nabídky LD byla vybrána pigtailová dioda z důvodu snadného napojení na optické vlákno. Hlavním parametrem je vlnová délka ve viditelném spektru v rozmezí 300 - 532 nm (laser fialové, modré a zelené barvy), která je vhodná díky nízkému útlumu v prostředí vodní páry. Vlnovou délku vyzařovaného světla je možné ovlivnit změnou pracovního proudu LD. S nárůstem proudu souvisí i rostoucí pracovní teplota, díky které dochází k degradování vlastností LD a snižování její životnosti. Z tohoto důvodu by se měla kontrolovat teplota laseru. Seriózní

výrobce obvykle poskytuje v katalogovém listu křivky životnosti při dané pracovní teplotě a výstupním výkonu. Laserové diody jsou také velice náchylné k poškození napěťovými špičkami, které se mohou naindukovat do přívodního vodiče diody. Je proto vhodné stínit napájení LD hlavně u spínaných zdrojů.

4.2.2 Teplotní senzor, chladič

Pro stabilní činnost LD je zapotřebí kontrolovat její teplotu. Většina aplikací s laserovými diodami využívá v praxi termoelektrické chladiče založené na Peltierově článku, ke kterému je dioda připevněna. Tento typ chladiče má jeden velký nedostatek, a tím je obrovská spotřeba proudu, která se běžně pohybuje kolem 10A. Naopak jeho výhodou je dosažení i velmi nízkých teplot chlazeného zařízení. V závislosti na směru procházejícího proudu přes chladič je možné LD chladit, ale i ohřívat. [33] Jako teplotní senzor se nejčastěji využívají termistory. V tomto případě bude stačit pro ověření správné činnosti chlazení pomocí běžného ventilátoru, který je oproti Peltierově článku levnější.

4.2.3 Napájecí zdroj pro LD

Hlavními požadavky na napájecí zdroj je proudová a teplotní stabilita, nízký šum a malé zvlnění výstupního napětí. Nestabilní zdroj nebo nedostatečně potlačená úroveň šumu mohou způsobit změnu výstupního výkonu a i vlnové délky LD. V horším případě může dojít i k jejímu poškození. Z těchto důvodů je vybrán zdroj lineární. Na rozdíl od spínaných zdrojů jsou lineární zdroje obvodově jednodušší a neobsahují spínací prvky, které jsou zdrojem rušivých signálů. Naopak nevýhodou lineárních zdrojů vůči spínaným je jejich cena, rozměry a nižší účinnost, což v tomto případě není až tak podstatné [34].

4.2.4 Fotodioda

K zavedení zpětné vazby slouží fotodioda zapojená antiparalelně k laserové diodě. Díky ní je možné ovlivňovat proud procházející LD a výstupní výkon. Někdy bývá integrována přímo v pouzdře LD.

4.2.5 Ochranné bloky

Důležitá je ochrana LD před napětím převyšujícím 1V v závěrném směru jak v kontinuálním, tak pulzním režimu. Proto se k LD připojuje antiparalelně rychlá ochranná dioda. Při provozu se musí také dbát na odvod tepla, zejména u kontinuálně pracujících laserů. Laserová dioda se velmi rychle ohřívá, snižuje svůj odpor, tím se zvyšuje procházející proud a mohlo by dojít ke zničení v důsledku kladné zpětné vazby. Dalším nebezpečím jsou krátkodobé přechodné jevy způsobené spínáním a vypínáním zdroje. Řešením tohoto problému je použití obvodu s pomalým náběhem, který svým zpožděním omezí proudové špičky po zapnutí zdroje. Naopak při vypnutí je třeba LD odpojit pomocí paralelně zapojeného relé nebo FET tranzistoru [22],[23],[33].

4.2.6 Mikrokontrolér (MCU)

K řízení celého zdroje je použit mikrokontrolér AVR ATmega 162 - 16PU. Jedná se o architekturu typu RISC, což je procesor se zjednodušeným souborem instrukcí (z angl. Reduced Instruction Set Computer).

Tento čip obsahuje 16kB interní Flash paměti, 512B paměti EEPROM a 1kB interní SRAM paměti. Je možné ho programovat pomocí ISP rozhraní, dále pomocí 4 signálů (MISO, MOSI, SCK a RESET) sériového periferního rozhraní SPI nebo přes JTAG. Mikrokontrolér nabízí také 8bitový a 16bitový čítač, 6 kanálů PWM, rozhraní SPI a USART, programovací diagnostický časovač watchdog, 5 sleep módů, RC oscilátor, 35 I/O pinů aj. Napájecí napětí tohoto obvodu se pohybuje v mezích od 2,7 V – 5,5 V.

Slouží k nastavování výstupního výkonu LD a zároveň umožňuje ovládat zdroj z PC. Pomocí údaje z teplotního senzoru, který měří teplotu LD, je zpětnou vazbou nastavován proud diodou. V případě nárůstu teploty nad určitou mez, je sepnut ventilátor.

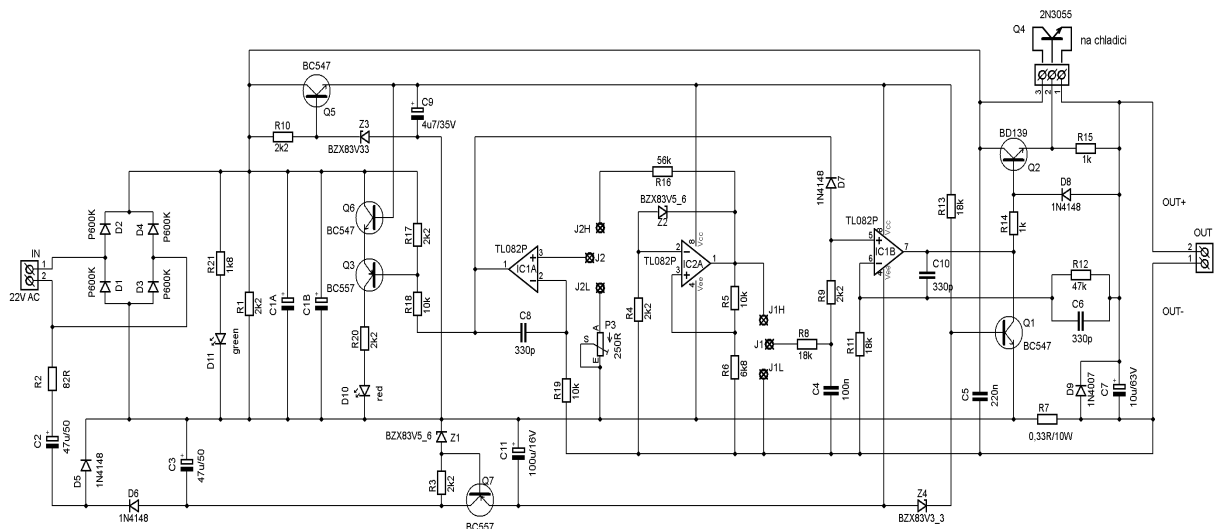
5 Realizace napájecího modulu

5.1 Zdroj

Při návrhu napájecího zdroje byly zvoleny tyto základní parametry:

- **vstupní napětí** obvodu (svorky IN 1 a 2) - 22V stř.
- **vstupní proud** - 1A
- **výstupní napětí** (svorky OUT 1 a 2) – regulovatelné 0-30V ss
- **výstupní proud** – regulovatelný až do 3A

5.1.1 Schéma zapojení



Obr. 5.1: Schéma zapojení napájecího zdroje. Upraveno z [37]

5.1.2 Popis funkce

Na svorky obvodu IN 1 a 2 je připojeno sekundární vinutí transformátoru. Jeho velikost je 22,2 V / 1 A. Následně je střídavé napětí usměrněno diodovým můstkem, který je tvořen diodami $D_1 - D_4$. Jako diody jsem zvolil běžně dostupné P600K, které jsou dimenzované na dostatečně velké závěrné napětí i propustný proud. Pulzní napětí je za usměrňovačem vyhlazeno RC filtrem. Pro menší zvlnění výstupního napětí jsem zapojil paralelně dva kondenzátory o kapacitě 3300 uF. Je zde také zapojena zelená LED dioda D_{11} , která slouží k signalizaci zapnutí zdroje.

V levé horní části se nachází omezovač napájecího napětí pro kladnou větev operačních zesilovačů. Je tvořen součástkami R_{10} , C_9 , Q_5 a Z_3 . Vlevo dole se naopak nachází zdroj záporného předpětí pro operační zesilovače ze součástek R_2 , C_2 , C_3 , D_5 , D_6 . Záporné předpětí je stabilizováno pomocí Q_7 , R_3 , Z_1 .

Toto zapojení dále obsahuje tři operační zesilovače. IC2A slouží jako zdroj referenčního napětí. Velikost referenčního napětí určují odpory R_5 a R_6 . Napětí mezi vstupy tohoto operačního zesilovače je nulové, takže napětí na odporu U_{R5} je rovno napětí U_{Z2} . Vzhledem k tomu, že proud protékající odpory R_5 a R_6 je stejný, pak celkové referenční napětí je rovno následujícímu vztahu 5.1:

$$U_{REF} = U_{R5} + U_{R6} = 5,6 + \left(\frac{5,6}{10k} * 6,8k\right) = 9,4 \text{ [V]} \quad (5.1)$$

Zenerova dioda Z_2 zajišťuje teplotní stabilitu celého zdroje.

Další částí je operační zesilovač IC1B, který slouží k regulování výstupního napětí. Na jeho neinvertujícím vstupu lze pomocí potenciometru P_1 , nebo v tomto případě digitálně, nastavovat hodnotu výstupního napětí. Tento OZ zesiluje referenční napětí na 33,8V dle vztahu 5.2:

$$A = \left(\frac{R_{11} + R_{12}}{R_{11}}\right) = \frac{18k + 47k}{18k} = 3,6 \text{ [-]} \quad (5.2)$$

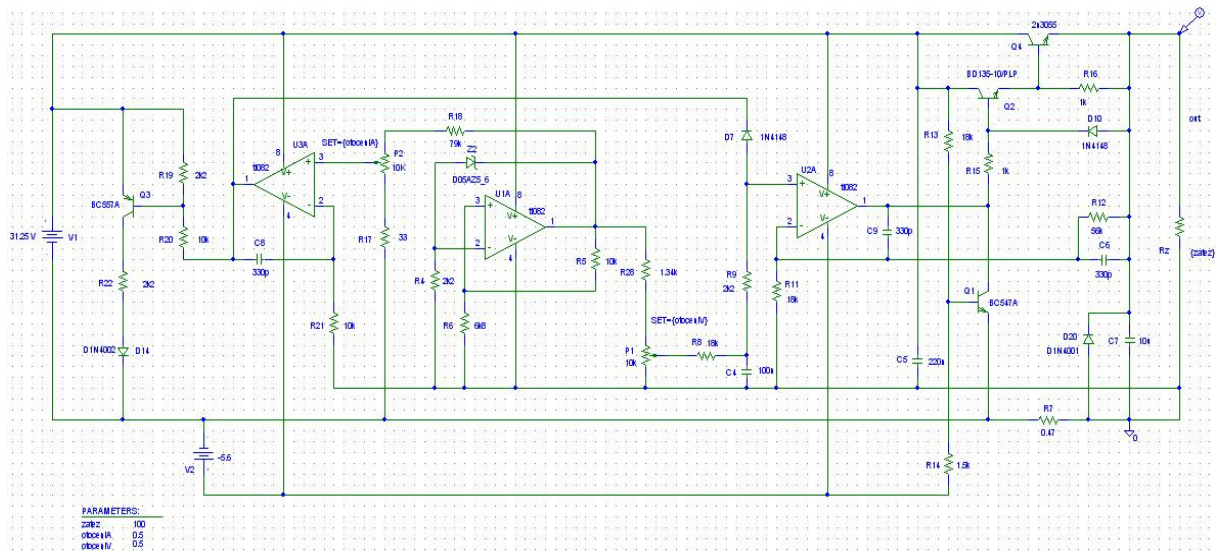
Třetím OZ je IC1A, který slouží k regulaci výstupního proudu. Na neinvertujícím vstupu tohoto zesilovače lze pomocí potenciometru P_2 , nebo opět digitálně, nastavovat hodnotu výstupního proudu. Trimrem P_3 je možné doladit spodní hranici výstupního proudu.

Zdroj může pracovat v režimu konstantního napětí i v režimu konstantního proudu. Ve druhém případě je tento režim indikován rozsvícením červené LED diody D_{10} , která se rozsvítí po otevření tranzistoru Q_3 .

Přes odpor R_{14} je napětí přiváděno na tranzistory Q_2 a Q_4 , které jsou v tzv. Darlingtonově zapojení. Tranzistor Q_4 s označením 2N3055 je dimenzován na $I_C = 4 \text{ A}$. Jeho výkonová ztráta $P_{tot} = 115 \text{ W}$. V případě zvolení výstupních parametrů 30 V a 3 A, zbývá ještě dostatečná rezerva do maximální hodnoty výkonové ztráty. Tudíž lze použít i menší chladič. K ochraně při absenci záporného předpětí slouží tranzistor Q_1 , který svým sepnutím odpojí výstup. Pokud funguje záporné předpětí správně, je tento tranzistor uzavřen diodou Z_4 .

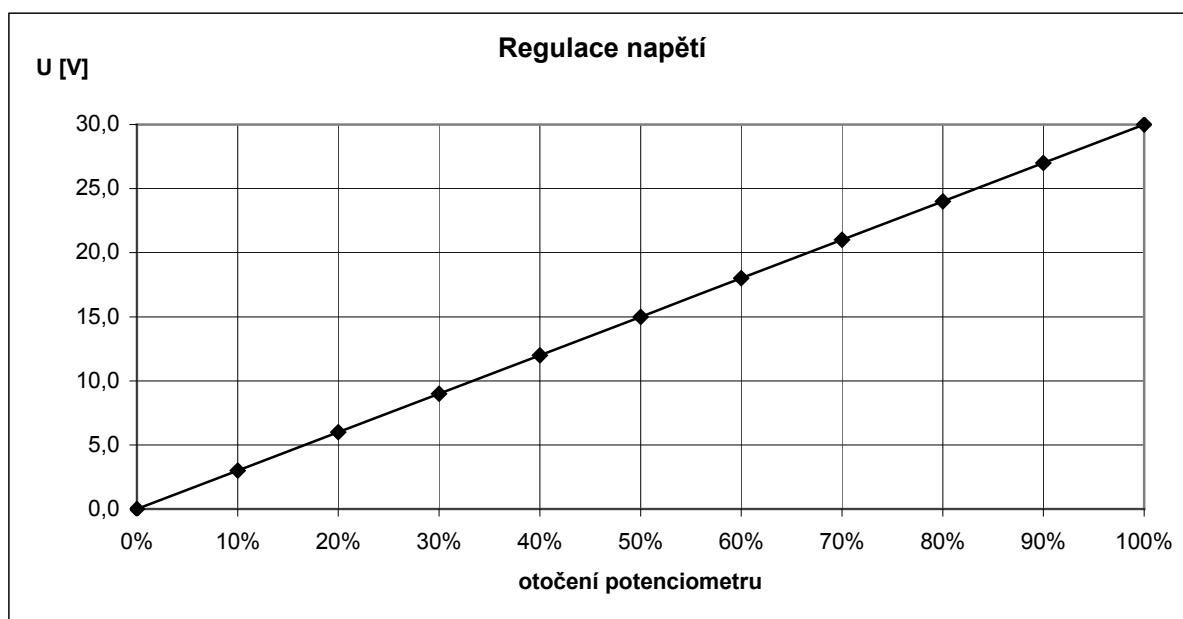
5.1.3 Simulace

Simulace ať už části nebo celku elektronického zařízení by měla být nedílnou součástí každého návrhu. Simulace byla provedena v programu PSpice A/D, konkrétně v grafickém editoru Schematics. Slouží k ověření správného zapojení obvodu a umožňuje lehce modifikovat jeho parametry. Simulací byla ověřena analogová regulace napětí a proudu pomocí potenciometrů, dále zatěžovací charakteristika zdroje pro dvě hodnoty svorkového napětí, a dvě hodnoty proudu zátěží. Schéma zapojení obvodu pro měření zatěžovací charakteristiky je na následujícím obr. 5.2. Ze zdroje byla simulována pouze hlavní část. V zapojení byl transformátor, usměrňovač a filtr nahrazen zdrojem stejnosměrného napětí o stejné špičkové hodnotě $U = 31,25$ V. Dále byl nahrazen i zdroj záporného předpětí stejnosměrným zdrojem a byly vynechány omezovače napájení OZ.

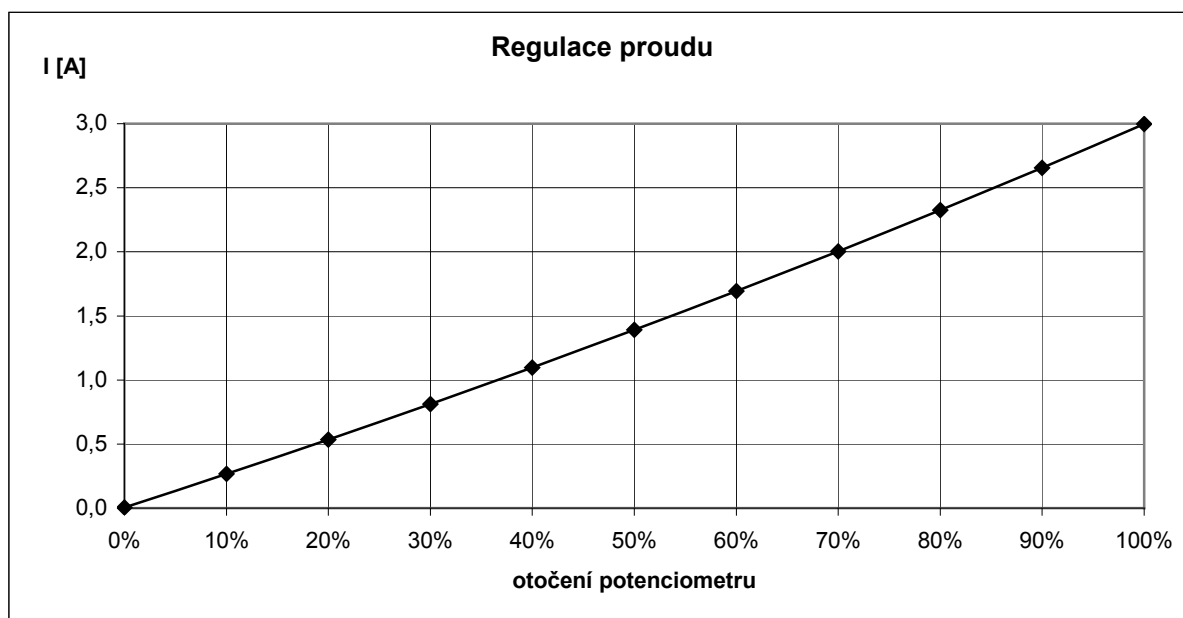


Obr. 5.2: Schéma obvodu pro simulaci.

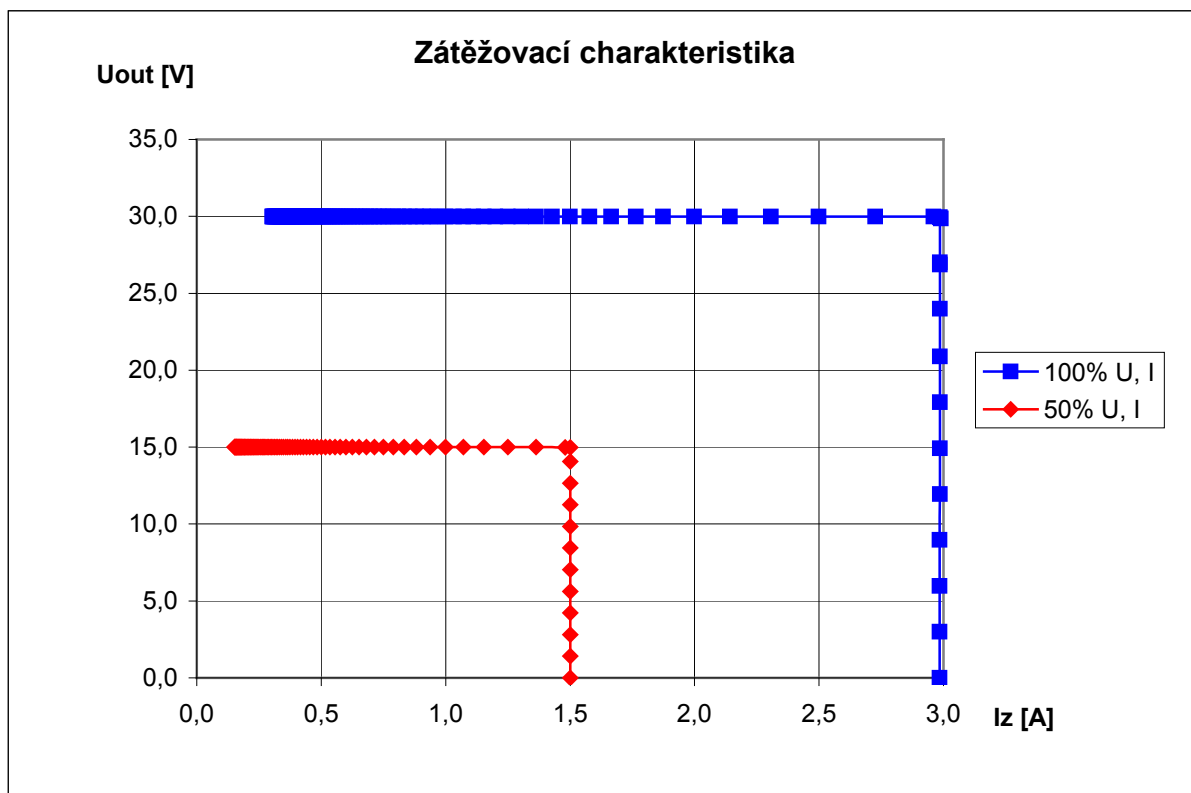
Na následujících obr. 5.3 a 5.4 je možné si prohlédnout simulaci regulace napětí a proudu v závislosti na otočení potenciometru. Napětí je možné regulovat do hodnoty $U = 30$ V a proudová regulace pracuje do maximálního proudu 3 A. Další obr. 5.5 zobrazuje zatěžovací charakteristiku pro plné napětí $U = 30$ V, plný proud $I = 3$ A a zároveň pro poloviční hodnoty napětí i proudu.



Obr. 5.3: Simulace regulace napětí.



Obr. 5.4: Simulace regulace proudu.



Obr. 5.5: Simulace zatěžovací charakteristiky.

5.1.4 Konstrukce a oživení

Výsledný návrh desek plošných spojů je umístěn v příloze. Při osazení je důležité pečlivě zkontrolovat správné rozmístění součástek, jejich orientaci především u tranzistorů, diod, elektrolytických kondenzátorů, integrovaných obvodů a u odporů velikosti.

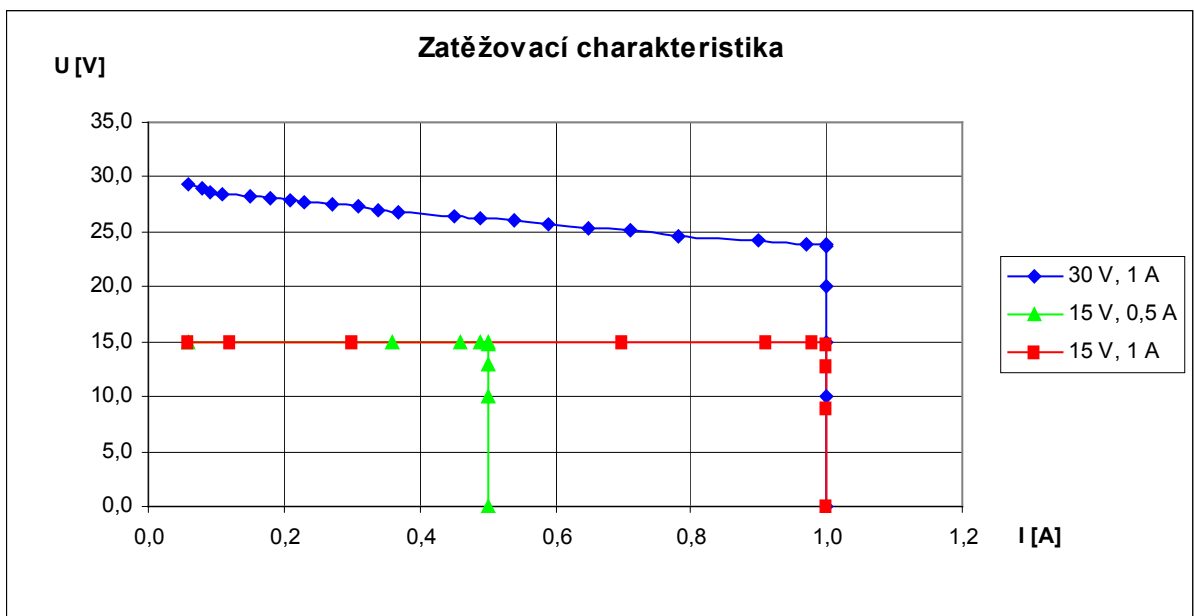
Dalším krokem je připojení napájecího napětí z transformátoru 220 V / 22,1 V na vstupní svorky IN 1 a 2. Pro správnou funkci zdroje je třeba ověřit napětí na pinu č.1 u IC2, kde by měla být hodnota referenčního napětí $U = 9,4$ V. Napětí na pinu č.4 u IC1 by mělo odpovídat zápornému předpětí $-5,6$ V. Při regulaci výstupního napětí se hodnota na pinu č.6 u IC1 musí pohybovat v rozmezí $U = 0 - 30$ V. Při regulaci proudu naměříme na pinu č.3 u IC1 hodnotu $U = 0 - 1,5$ V. Pokud změřené hodnoty odpovídají výše popsaným, nic by nemělo bránit správné funkci zdroje.

5.1.5 Naměřené hodnoty

Jako první byla ověřena regulace napětí a změřena hodnota napětí naprázdno $U_o = 29,9$ V. Poté byla nastavena spodní hranice proudového rozsahu pomocí trimru P3 na hodnotu 5mA a ověřena regulace proudu. Horní hranice proudového rozsahu dosáhla téměř $I = 3,5$ A. Následující obr. 5.6 zobrazuje odměřenou zatěžovací charakteristiku pomocí reostatu $250\Omega/1A$ při plném napětí a proudu 1A a při polovičním napětí a polovičním proudu. Ze změřené charakteristiky při $U = 15$ V a proudu $I = 1A$ (červená křivka) byla spočtena hodnota vnitřního odporu zdroje podle vztahu 5.3:

$$R_{IN} = \left(\frac{U_o - U_x}{I_x} \right) = \frac{15 - 14,9}{0,98} = 102 m\Omega, \quad (5.3)$$

kde U_o je napětí naprázdno a U_x je hodnota napětí před sepnutím proudového omezení. I_x je hodnota proudu při U_x . Posledním změřeným parametrem zdroje bylo zvlnění výstupního napětí pomocí osciloskopu. Pro výstupní napětí 24 V při proudu 1 A bylo z osciloskopu odečteno zvlnění $U = 1,05$ V.



Obr. 5.6: Změřené zatěžovací charakteristiky zdroje.

Seznam tabulek pro hodnoty změřených zatěžovacích charakteristik.

I [A]	U [V]
0,06	29,40
0,08	28,90
0,09	28,70
0,11	28,40
0,15	28,20
0,18	28,00
0,21	27,90
0,23	27,70
0,27	27,50
0,31	27,30
0,34	27,00
0,37	26,80
0,45	26,50
0,49	26,20
0,54	26,00
0,59	25,70
0,65	25,40
0,71	25,10
0,78	24,70
0,90	24,30
0,97	23,90
1,00	23,80
1,00	23,70
1,00	20,00
1,00	15,00
1,00	10,00
1,00	0,01

Tab. 6: Hodnoty zatěžovací charakteristiky (30 V, 1 A)

I [A]	U [V]
0,06	15,00
0,12	15,00
0,30	15,00
0,70	15,00
0,91	15,00
0,98	14,90
1,00	14,70
1,00	12,80
1,00	9,00
1,00	0,01

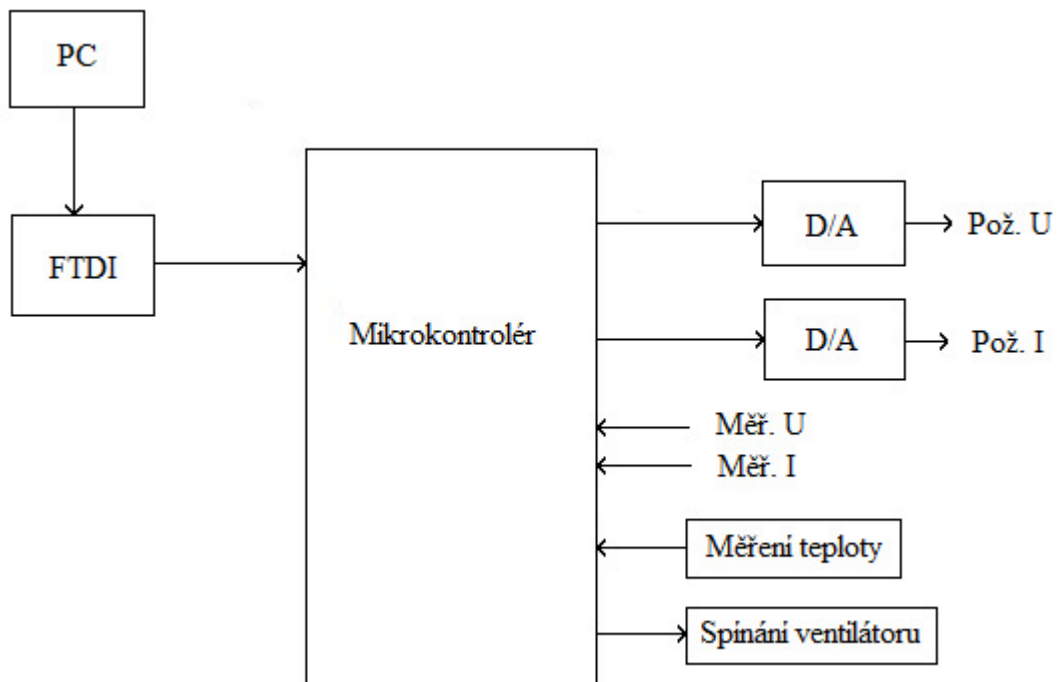
Tab. 7: Hodnoty zatěžovací charakteristiky (15 V, 1 A)

I [A]	U [V]
0,06	15,00
0,36	15,00
0,46	15,00
0,49	15,00
0,50	15,00
0,50	14,70
0,50	13,00
0,50	10,00
0,50	0,01

Tab. 8: Hodnoty zatěžovací charakteristiky (15 V, 0,5 A)

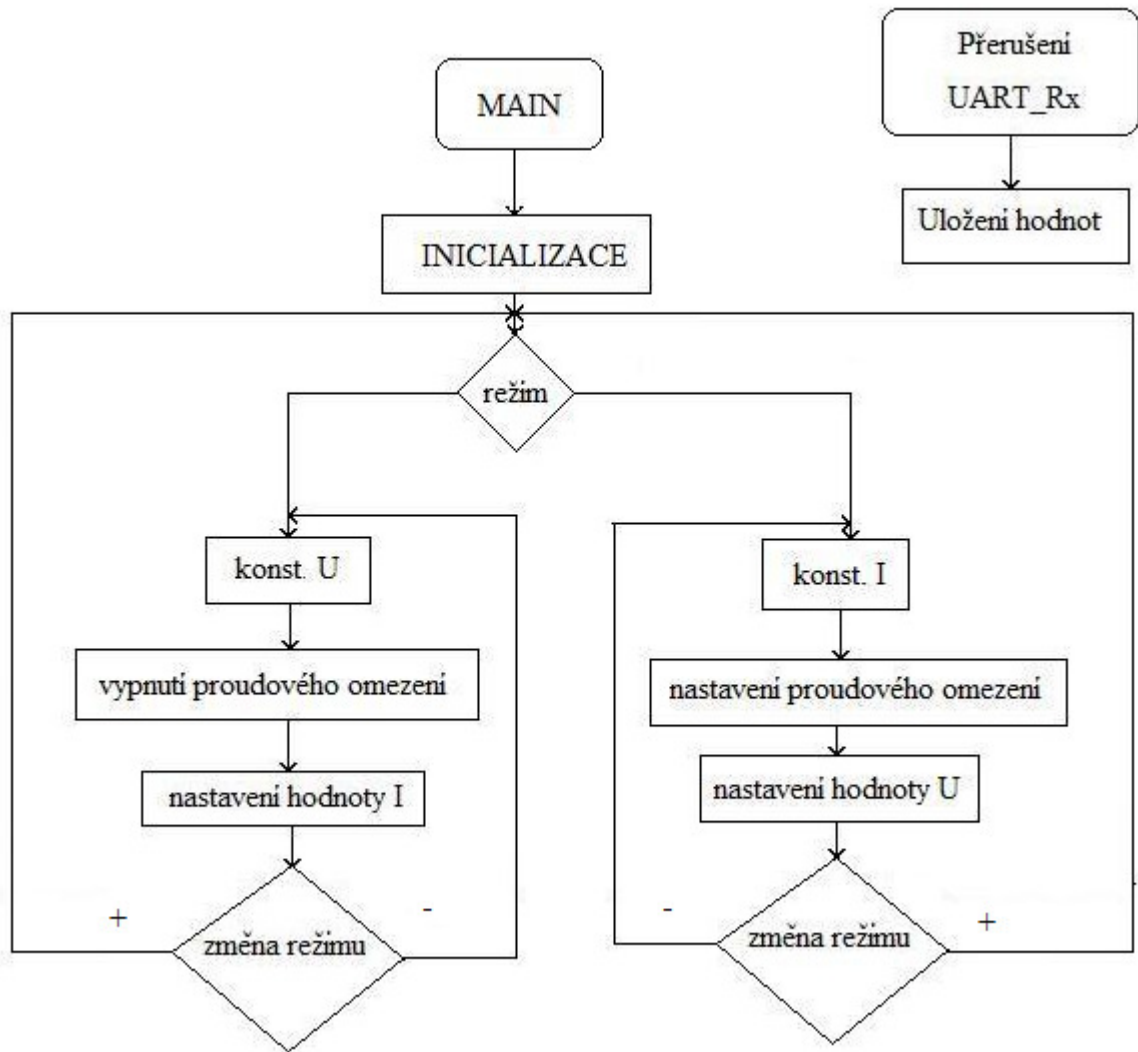
5.2 Řízení

Řídící část obsahuje mikrokontrolér AVR ATmega 162 - 16PU. Tento integrovaný obvod řídí funkci celého zdroje a obsluhuje vstupní či výstupní periferie. Vzhledem k tomu, že nemá integrované USB rozhraní pro komunikaci s PC, je třeba použít FTDI, což je externí převodník mezi UART a USB. Dále nastavuje hodnoty výstupního napětí a proudu napájecího zdroje pomocí dvou D/A převodníků typu MCP4921. Jedná se o 12-bitové převodníky s rozhraním SPI. Další obsluhovanou periferií je NTC termistor, pomocí kterého se měří teplota laserové diody. Při překročení určité mezní teploty dojde k sepnutí ventilátoru a laserová dioda se začne chladit. Blokové schéma řídicího obvodu je na obr. 5.7.



Obr. 5.7: Blokové schéma řídicího obvodu

Na následujícím obr. 5.8 se nachází vývojový diagram programu. Po zapnutí procesoru se provede inicializace, kdy dojde k otestování periferií, nastavení vnitřních registrů, portů, oscilátoru, atd. Následně je možné si zvolit režim, buďto režim konstantního proudu nebo napětí. V daném režimu se zpracují požadavky obsluhy a nastaví se výstupní hodnoty.



Obr. : Vývojový diagram programu

Závěr

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout a zkonstruovat digitálně řízený napájecí zdroj pro laserové diody, který nalezne své uplatnění při měření vibrací lopatek parních turbín. Nejprve byla rozebrána teorie laserů, která umožňuje získat základní přehled o těchto součástkách. Čtenáři se dozví o jejich historii, fyzikální podstatě, základních parametrech, možnostech napájení, výhodných i nevýhodných vlastnostech, možnostech využití a bezpečnosti práce při používání laserů. Stěžejním tématem teoretické části je monitorování lopatek parních turbín. Na základě informací ze třetí kapitoly je možné si udělat představu ohledně dostupnosti laserů či laserových modulů na trhu. Návrhu napájecího modulu s digitálním řízením je věnována 4. kapitola. Samotná konstrukce je uvedena v následující páté. Nejprve byl zkonstruován napájecí zdroj a odměřeny jeho parametry. Byly dosaženy předem stanovené požadavky. Napětí je možné regulovat do maximální hodnoty $U = 29,9 \text{ V}$. Regulace proudu funguje do maximální hodnoty $3,5 \text{ A}$. Odměřené zatěžovací charakteristiky byly porovnány se simulací v programu PSpice A/D. Dále byl vypočítán vnitřní odpor zdroje, který vyšel $R_{IN} = 102 \text{ m}\Omega$. Zvlnění výstupního napětí dosáhlo hodnoty $U = 1,05 \text{ V}$ při výstupním napětí $U = 24 \text{ V}$ a při proudu zátěží $I = 1 \text{ A}$. Jako budoucí vylepšení bych doporučil nahradit klasické odpory za odpory smd, čímž dojde ke zmenšení napájecí desky. V případě umístění do konstrukční skříně by bylo vhodné umístit signalizační LED diody přes konektor na čelní panel místo osazení přímo v desce. Z bezpečnostních důvodů by se mohl ještě tranzistor Q2 umístit na chladič.

Seznam literatury

- [1] Krejčí, R., Hulcius, E.: Polovodičové lasery a LED-ky. *Microdesignum* [online]. 2007 [cit. 09.10.2013]. Dostupné z: <<http://www.microdesignum.cz/clanky/Polovodicove-lasery-a-LED-ky.html>>
- [2] Russel: Benefit of the Blue Laser Diode. Aid-n.com [online]. 2012 [cit. 13.10.2013]. Dostupné z: <<http://www.aid-n.com/application-and-benefit-of-the-blue-laser-diode/benefit-of-the-blue-laser-diode/>>
- [3] Bright Idea: The First Lasers. Aip.org [online]. [cit. 16.10.2013]. Dostupné z: <<http://www.aip.org/history/exhibits/laser/sections/>>
- [4] Sajdlová, S.: Vybrané optické a transportní vlastnosti polykrystalu Ga₂Te₃. Bakalářská práce [online]. 2012 [cit. 22.10.2013]. Pardubice: Fakulta chemicko-technologická. Dostupné z: <http://dspace.upce.cz/bitstream/10195/47515/2/SajdlovaS_VlastnostiGa2Te3_PJ_2012.pdf>
- [5] Vávrová, J.: Laser - princip činnosti. MZČR [online]. [cit.17.10.2013]. Dostupné z: <http://ciselniky.dasta.mzcr.cz/CD_DS4/hypertext/JVABW.htm>
- [6] Stimulovaná emise, Wikipedia.org [online]. [cit. 8.10.2013]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Stimulovan%C3%A1_emise>
- [7] Ryba, J.: Seriál na téma lasery - základní princip laseru a jejich dělení. Lao.cz [online]. 2013 [cit. 11.10.2013]. Dostupné z : <<http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>>
- [8] Vrbová, M. et al.: Úvod do laserové techniky. Dot. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1998, 228 s. ISBN 80-01-01108-9.
- [9] Voves, J.: Interakce záření s polovodičem, ČVUT, Přednáška z předmětu: Fyzika polovodičů [online]. [cit. 22.10.2013]. Dostupné z: <http://www.micro.feld.cvut.cz/home/34epo/prednasky/opt_bezo.pdf>
- [10] Letovská, M.: Ochrana zdraví při práci s lasery. BOZPinfo.cz [online]. 2011 [cit. 23.10.2013]. Dostupné z : <http://www.bozpinfo.cz/win/knihovna-bozp/citarna/tema_tydne/BOZP_lasery110923.castdruha.html>
- [11] Řiháková, L.: Možnosti využití laserů v lékařství. Diplomová práce [online]. 2012 [cit. 23.10.2013]. Univerzita Palackého v Olomouci: Přírodovědecká fakulta
- [12] Lukáš, M.: Laserové diody 2 - Typy a struktury laserových diod. Elektrevue.cz [online]. 2001 [cit. 24.10.2013]. Dostupné z: <<http://www.elektrevue.cz/clanky/01043/index.html>>
- [13] Heteropřechod. Britannica.com [online]. [cit. 25.10.2013]. Dstupné z: <<http://www.britannica.com/EBchecked/topic/264291/heterojunction>>
- [14] ht Saleh, A.E.B., Teich, C.M.: Fundamentals of Photonics, ČVUT [online]. 1991 [cit. 24.10.2013]. Dostupné z: <<http://people.fjfi.cvut.cz/sulcjan1/FLA/fotonika/Fotonika-3-text.pdf>>

- [15] Paschotta, R.: Edge-emitting Semiconductor Lasers, Rp - photonics.com [online]. [cit. 25.10.2013]. Dostupné z: <http://www.rp-photonics.com/edge_emitting_semiconductor_lasers.html>
- [16] Šulc, J.: Lasery a jejich aplikace [online]. 2002 [cit. 28.10.2013]. Dostupné z: <<http://www.plslaser.cz/pdf/lasery.pdf>>
- [17] Reichl, J., Všetická, M.: Použití laserů. Encyklopedie fyziky [online]. [cit. 31.10.2013]. Dostupné z: <<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/791-pouziti-laseru>>
- [18] Černý, V.: Laser - od objevu k průmyslovým aplikacím, Elektro [online]. 04/2005 [cit. 31.10.2013]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=26271>
- [19a] Nová lopatka je klenotem ŠKODY POWER. Škoda news pro univerzity - II. ročník [online]. 3/2006 [cit. 31.10.2013]. Dostupné z: <<http://www.skoda.cz/cs/kariera/pro-studenty/skoda-news/Contents.2/0/99DE29F2F82C4D35A7AC4C443F4B7816/resource.pdf>>
- [19b] Tipnete si, v jakém stroji je použita tato lopatka a jakou rychlostí se pohybuje její špička? Ústav termomechaniky AV ČR [online]. [cit. 26.3.2014]. Dostupné z: <<http://www.it.cas.cz/lopatka>>
- [20] Liška, J. et al.: Bezkontaktní měření vibrací bandážovaných lopatek parních turbín. Allforpower.cz [online]. 2013 [cit. 31.10.2013]. Dostupné z: <http://www.allforpower.cz/UserFiles/files/2011/lopatky_mereni.pdf>
- [21] Chaplin, M.: Water Absorption Spectrum. Water structure and science [online]. [cit. 31.10.2013]. Dostupné z: <<http://www1.lsbu.ac.uk/water/vibrat.html#r130>>
- [22] Lukáš, M.: Laserové diody - Napájení, impulsní režim a aplikace laserových diod. Elektrorevue.cz [online]. 2002 [cit. 1.10.2013]. Dostupné z: <<http://www.elektrorevue.cz/clanky/02059/index.html>>
- [23] Laser Diode Drivers, Wavelength Electronics [online]. [cit. 1.10.2013]. Dostupné z: <<http://www.teamwavelength.com/info/laserdiodedrivers.php>>
- [24] Lukáš, M.: Laserové diody - Parametry laserových diod a jejich měření. Elektrorevue.cz [online]. 2002 [cit. 5.10.2013]. Dostupné z: <<http://www.elektrorevue.cz/clanky/02023/index.html>>
- [25] Laser a dělení laserů. ČVUT [online]. [cit. 5.10.2013]. Dostupné z: <<https://www.fbmi.cvut.cz/files/predmety/30/public/Laser%20a%20deleni%20laseru.pdf>>
- [26] Dimitriadis, G. et al.: Blade-tip Timing Measurement of Synchronous Vibrations of Rotating Bladed Assemblies. In: Mechanical Systems and Signal Processing [online]. 2002 [cit. 12.10.2013]. Dostupné z: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327002914895>>
- [27] Lukáš, M.: Laserové diody - Funkce a základní parametry. Světlo [online]. 02/2005 [cit. 14.11.2013]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=26271>

- [28] Toms, P.: 3D CFD simulace proudění v turbinovém stupni. ČVUT [online]. [cit. 15.11.2013]. Dostupné z: <<http://stc.fs.cvut.cz/history/2011/sbornik/papers/pdf/1100024-1.pdf>>
- [29] Szczepanik, R. et al.: Application of Blade-Tip Sensors to Blade-Vibration Monitoring in Gas Turbines. Intechopen.com [online]. 2012 [cit. 25.1.2014]. Dostupné z: <<http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/26042.pdf>>
- [30] Laser i-learning. Leonardo technology - automatizace průmyslového značení [online]. [cit. 4.2.2014], s.4,5,6. Dostupné z: <<http://www.lt.cz/cs/znaceni-laserem-solaris/lasery-info-learning?limit=1&start=4>>
- [31] Ye, C., Wei, K.T.: Tunable External Cavity Diode Lasers, World Scientific, 2004,262 s. ISBN 981-256-088-2
- [32] Health, S., Imregun, M.: An improved single - parameter tip-timing method for turbomachinery blade vibration measurements using optical laser probes. In: International Journal of Mechanical Science [online]. 1996 [cit. 2.4.2014]. Dostupné z: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0020740395001166>>
- [33] Laser Diode Technology. Newport - Experience/Solutions [online]. [cit. 5.4.2014]. Dostupné z: <<https://www.newport.com/Tutorial-Laser-Diode-Technology/852182/1033/content.aspx>>
- [34] Hammerbauer, J.: Elektronické napájecí zdroje a akumulátory. Vyd. 2. Plzeň: Západočeská univerzita, 1998, vi, 181 s. ISBN 80-7082-411-5
- [35] Lazar, J. et al.: Laser diode current controller with a high level of protection against electromagnetic interference. AIP [online]. 2003 [cit. 10.4.2014]. Dostupné z: <<http://scitation.aip.org/content/aip/journal/rsi/74/8/10.1063/1.1593783>>
- [36] Šmíd, D.: napájecí zdroj 0-30 V s regulovatelným proudem 2mA - 3A. Hw.cz [online]. 2005 [cit. 11.4.2014]. Dostupné z: <<http://www.hw.cz/teorie-a-praxe/konstrukce/napajeci-zdroj-0-30v-s-regulovatelnym-proudem-2ma-3a.html>>
- [37] Liška, J. et al.: The blade flutter measurement based on the blade tip timing method. ZČU [online]. 2011 [cit. 15.4.2014], s. 270-275. Dostupné z: <<http://www.wseas.us/e-library/conferences/2011/Corfu/SYSTEMS/SYSTEMS-43.pdf>>

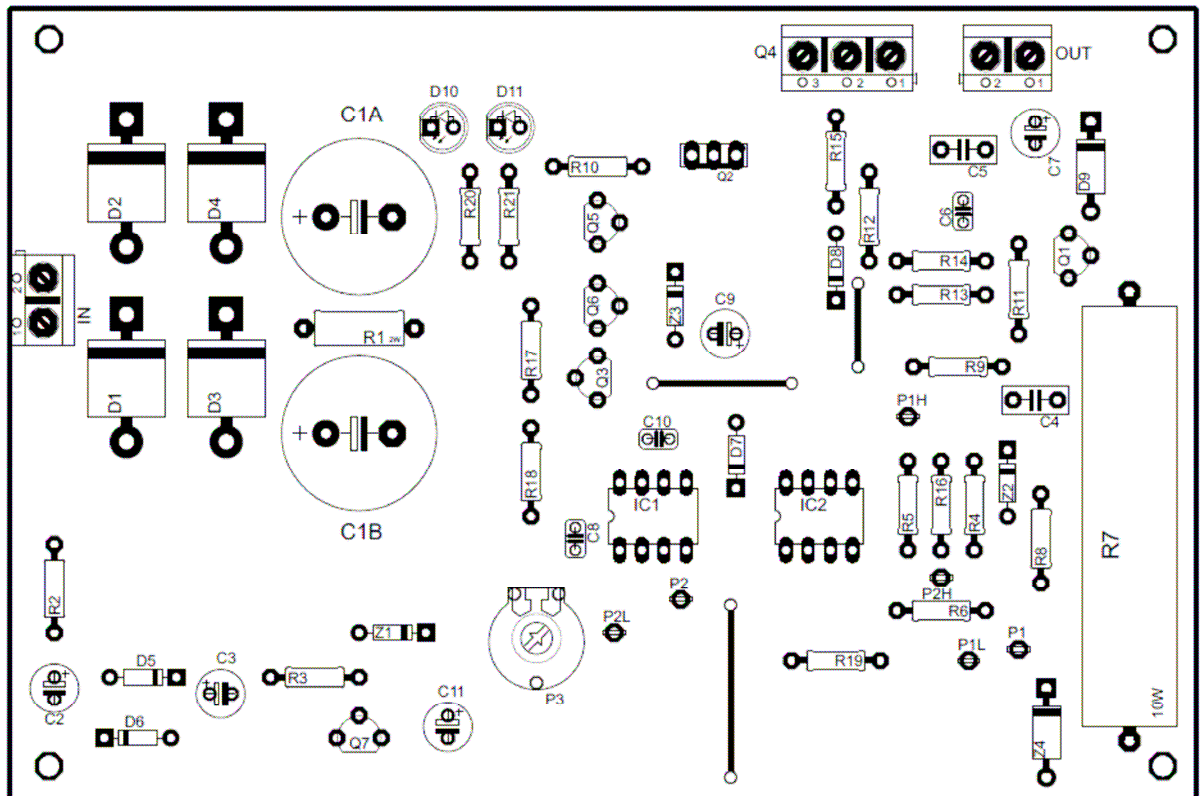
Seznam příloh

Příloha A: DPS napájecího zdroje

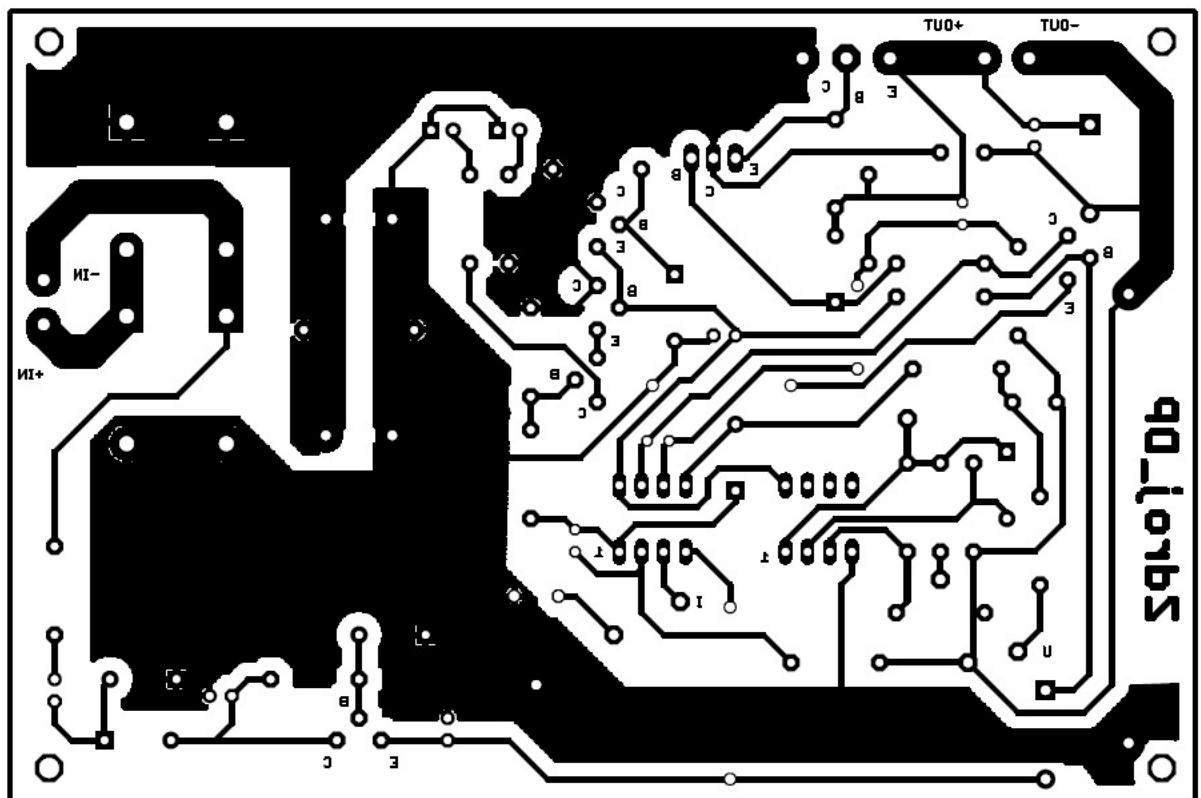
Příloha B: Seznam součástek

Příloha C: Fotografie

Příloha A:



Obr.: Rozmístění součástek a propojek na desce o velikosti 135 x 90 mm.



Obr.: Spoje a pájecí plošky desky o rozměrech 135 x 90 mm.

Příloha B:

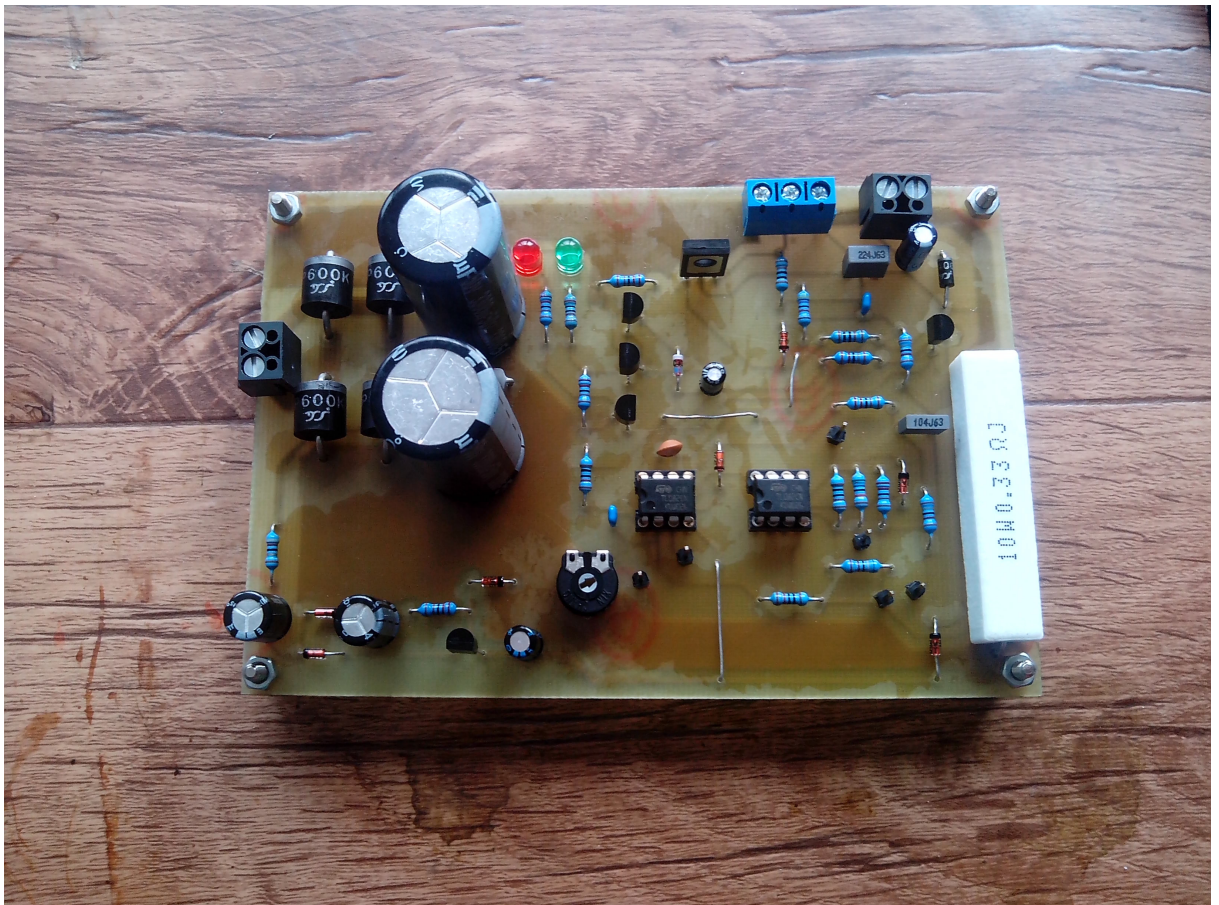
Seznam součástek zdroje (partlist)

Part	Value	Device	Package
ARK1/2	22V/1A AC	ARK500/2	ARK500/2
ARK2/2		ARK500/2	ARK500/2
C1A	3300u/50	CPOL-EUE7.5-18	E7,5-18
C1B	3300u/50	CPOL-EUE7.5-18	E7,5-18
C2	47u/50	CPOL-EUE2.5-6	E2,5-6
C3	47u/50	CPOL-EUE2.5-6	E2,5-6
C4	100n	100N-K/100	RM5_3,2
C5	220n	220N-K/63V	RM5_3,2
C6	330p	C-EU025-024X044	C025-024X044
C7	10u/63V	CPOL-EUE2.5-6	E2,5-6
C8	330p	C-EU025-024X044	C025-024X044
C9	4u7/35V	CPOL-EUE2.5-6	E2,5-6
C10	330p	C-EU025-024X044	C025-024X044
C11	100u/16V	CPOL-EUE2.5-6	E2,5-6
D1	P600K	D_P6	P6
D2	P600K	D_P6	P6
D3	P600K	D_P6	P6
D4	P600K	D_P6	P6
D5	1N4148	1N4148_7,5	DO35
D6	1N4148	1N4148_7,5	DO35
D7	1N4148	1N4148_7,5	DO35
D8	1N4148	1N4148_7,5	DO35
D9	1N4007	1N4007_10	DO41
D10	red	LED_5	LED_5
D11	green	LED_5	LED_5
IC1	TL082P	TL082	DIL8
IC2	TL082P	TL082	DIL8
P1	LSP10	LSP10	LSP10
P1H	LSP10	LSP10	LSP10
P1L	LSP10	LSP10	LSP10
P2	LSP10	LSP10	LSP10
P2H	LSP10	LSP10	LSP10
P2L	LSP10	LSP10	LSP10
P3	250R	TRIM_EU-PT10	PT-10
Q1	BC547	BC546	TO-92
Q2	BD139	BD139_STOJ	TO-126S
Q3	BC557	BC556	TO-92
Q4	2N3055	ARK500/3	ARK500/3
Q5	BC547	BC546	TO-92
Q6	BC547	BC546	TO-92
Q7	BC557	BC556	TO-92
R1	2k2	W2_2K2	R__2W
R2	82R	R_10	R-10
R3	2k2	R_10	R-10
R4	2k2	R_10	R-10
R5	10k	R_10	R-10
R6	6k8	R_10	R-10
R7	0,33R/10W	R__10W	R-_10W
R8	18k	R_10	R-10
R9	2k2	R_10	R-10
R10	2k2	R_10	R-10
R11	18k	R_10	R-10
R12	47k	R_10	R-10

R13	18k	R_10	R-10
R14	1k	R_10	R-10
R15	1k	R_10	R-10
R16	56k	R_10	R-10
R17	2k2	R_10	R-10
R18	10k	R_10	R-10
R19	10k	R_10	R-10
R20	2k2	R_10	R-10
R21	1k8	R_10	R-10
Z1	BZX83V5_6	D-ZENEROVA_0,5W_BZX83V	DO35
Z2	BZX83V5_6	D-ZENEROVA_0,5W_BZX83V	DO35
Z3	BZX83V33	D-ZENEROVA_0,5W_BZX83V	DO35
Z4	BZX83V3_3	D-ZENEROVA_2W_BZY	DO41

Fotocuprexitivová deska 150x100 mm
Drátové propojky 3 ks
Patice pod OZ 2 ks
Chladič pro Q4

Příloha C:



Obr. 5.8: Fotografie osazené desky.

