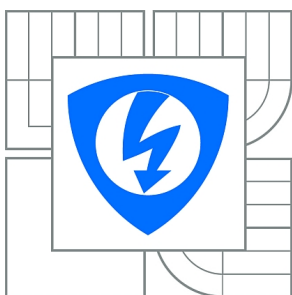




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

MĚŘENÍ VLASTNOSTÍ LASEROVÉHO ZDROJE S VÁLCOVOU OPTIKOU

MEASUREMENT OF LASER SOURCE WITH A CYLINDRICAL LENS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ALEŠ JELÍNEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. LUDVÍK BEJČEK, CSc.

BRNO 2011



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Automatizační a měřicí technika

Student: Aleš Jelínek

ID: 115193

Ročník: 3

Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Měření vlastností laserového zdroje s válcovou optikou

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Ověřte a navrhnete metodu pro zjišťování vlastností laserového zdroje s válcovou optikou v prostoru trojúhelníka o straně minimálně 1 m. Dále ověřte navržený poloautomatický systém měření intenzity laserového paprsku v závislosti na souřadnicích.

Metodu i systém realizujte a ověřte na existujících zdrojích, prvcích a komponentách ve firmě PROTOTYPA a.s.

Naměřené a zpracované výsledky podrobně a přehledně prezentujte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] HOBBS, P.,C.,D. Building electro-optical systems, making it all work. New York: John Wiley & Sons, 2000.

[2] Inteligentní hradla LS 04, katalogový list. Brno: Prototypa, a.s., 2010. Dostupné na [www: http://www.prototypa.cz/menu1.html](http://www.prototypa.cz/menu1.html).

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 30.5.2011

Vedoucí práce: doc. Ing. Ludvík Bejček, CSc.

prof. Ing. Pavel Jura, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Předmětem práce je návrh a realizace přístroje pro měření intenzity světla laserového zdroje s válcovou optikou. Cílem je kontrola vlastností laseru při jeho konstrukci – primárně stejnoměrné osvětlení v celé délce stopy. Při práci byl kladen důraz na minimální složitost konstrukce, redukci nákladů na výrobu, samozřejmě při splnění všech požadavků. Výsledkem je plně funkční přístroj, který již slouží v zadávající firmě.

Klíčová slova

laser, válcová optika, intenzita, osvětlení, snímač

Abstract

The purpose of this work is to design and create device for measuring the light intensity of laser source with cylindrical optics. It will be used to check laser source attributes during it's construction – primarily steady illumination along the whole line. The main goals were the minimization of construction complexity, reduction of cots and of course achieving all requirements. The product is fully funcntional machine, which works in company today.

Keywords

laser, cylindrical optics, intensity, light, sensor

Bibliografická citace:

JELÍNEK, A. *Měření vlastností laserového zdroje s válcovou optikou*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 46s. Vedoucí bakalářské práce byl doc. Ing. Ludvík Bejček, CSc.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma *Měření vlastností laserového zdroje s válcovou optikou* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **24. května 2011**

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Ludvíku Bejčkovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval vedoucímu vývoje firmy Prototypa a.s. Michalu Královi za spolupráci, mnoho informací a rad, díky kterým se podařilo celý projekt zdárně dokončit.

V Brně dne: **24. května 2011**

.....
podpis autora

Obsah

1. Úvod.....	1
1.1. Laserový zdroj v válcovou optikou.....	1
1.2. Rozbor zadání.....	2
2. Možnosti a řešení jednotlivých částí projektu.....	6
2.1. Mechanická konstrukce.....	6
2.2. Motor.....	9
2.3. Budič motoru.....	12
2.4. Řídicí elektronika.....	17
2.5. Optický senzor.....	20
2.6. Komunikace s PC.....	22
2.7. Firmware MCU.....	24
2.8. Software pro PC.....	26
3. Závěr.....	29
3.1. Bezpečnost.....	29
3.2. Reprodukovatelnost přístroje.....	29
3.3. Přesnost měření a zdroje chyb.....	30
3.4. Fotografie přístroje.....	32
3.5. Možnosti vylepšení přístroje.....	34
3.6. Zhodnocení.....	35
4. Seznam použité literatury.....	37

1 ÚVOD

Cílem této práce je návrh automatického měřicího systému pro zjišťování intenzity světla v jednotlivých bodech laserového paprsku upraveného válcovou optikou. Zařízení by mělo usnadnit a zpřesnit montáž čárových laserů¹, protože poskytne větší přehled o stejnoměrnosti intenzity a zakřivení paprsku. Nejprve stručně popíši daný laserový zdroj, dále uvedu konkrétní požadavky zadavatele – firmy Prototypa a.s. a poté budou nastíněny možnosti realizace celého projektu a důkladněji popsána varianta, pro kterou jsem se rozhodl. V závěru práce budou zhodnoceny dosažené výsledky a uvedeny poznatky důležité pro možný další vývoj přístroje.

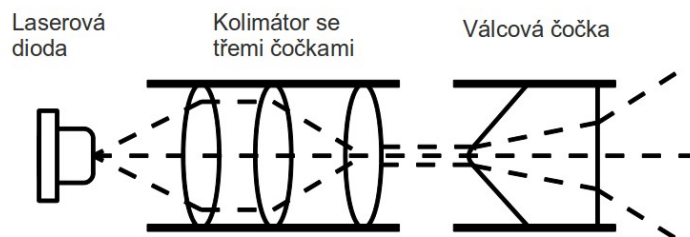
1.1 Laserový zdroj v válcovou optikou

Zdrojem záření je polovodičová laserová dioda. Rozdíl oproti klasické LED je v tom, že generované světlo má velmi úzké spektrum a je koherentní, čili má vlastnosti obvyklé pro laserový paprsek. Vyzařovací charakteristika však zdaleka není úzká (u některých typů může být úhel ve vrcholu světelného kužele i 30°) a je nejprve třeba záření upravit vhodnou optikou. Problém laserových diod je v tom, že nevyzařují rovnoměrně ve všech směrech, což ale není většinou na obtíž, protože se jejich světlo sjednotí do úzkého svazku. Laserové diody se používají pro malé výkony, obvykle do 500 mW, ale pokud jsou určeny pro pulzní provoz, lze nalézt součástky se špičkovým výkonem přes 20 W. Napájení je často realizováno jako zdroj proudu, přičemž pro náročnější aplikace existují speciální integrované řídicí obvody. Běžně se tyto diody používají v CD/DVD mechanikách, jako laserová ukazovátka, nebo v přístrojích pro měření vzdálenosti.

Světlo z laserové diody dále vstupuje do kolimátoru, kde je zaostřeno do bodu a vyrovnáno tak, aby vycházející paprsek byl co nejužší a měl co nejmenší rozbíhavost. Kolimátor je tvořen soustavou tří čoček v přesných rozestupech a úpravou jejich vzdálenosti k laserové diodě lze dosáhnout potřebného zaostření. Vzhledem k omezené přesnosti optického zařízení má samozřejmě paprsek nenulovou tloušťku a ani jeho průřez není dokonale kruhový, což spolu s laserovou diodou významně přispívá nestejnoměrnosti intenzity světla na výstupu.

Posledním členem optické soustavy je válcová čočka, která paprsek znovu rozloží, ale tentokrát jen v jedné rovině a tak vznikne laserový paprsek jehož stopa na osvětleném předmětu má tvar úsečky. Celá soustava je na Obr. 1. Obr. 2 pak ukazuje příklad přístroje používajícího čárový laser.

1 "Čárový laser" je v technické praxi často používané označení laserového zdroje s válcovou optikou. Přestože toto pojmenování není zcela přesné, běžně se používá a proto ho budu v dalším textu psát jako ekvivalent k fyzikálně výstižnějšímu pojmenování "laserový zdroj s válcovou optikou".



Obr. 1: Schematické znázornění laserového zdroje s válcovou optikou



Obr. 2: Přístroj s čárovým laserem (převzato z [10])

1.2 Rozbor zadání

Zadání bakalářské práce obsahuje následující úkoly:

- navrhnete vhodnou metodu pro zjišťování vlastností laserového zdroje s válcovou optikou v prostoru trojúhelníka o straně minimálně jeden metr
- metodu ověříte na existujících zdrojích ve firmě Prototypa a.s.

- navrhnete poloautomatický systém měření intenzity laserového paprsku v závislosti na souřadnicích a zrealizujete jej z prvků dodaných firmou Prototypa a.s.
- systém prakticky ověřte
- výsledky podrobně a přehledně prezentujte

Vzhledem k tomu, že zařízení je dosti komplexní (od optického snímače až po ovládací program pro PC) a má být využíváno v praxi, jsou zde ještě další technické požadavky, které již kladou nároky i na způsob provedení práce. Další specifikace dodaná firmou Prototypa a.s. obsahuje tyto body:

Požadavky na hardware:

- doba skenování celého svazku < 20 s
- komunikace s PC pomocí USB nebo RS232
- možnost uchycení na místo snímače na rámu hradel Prototypa LS-04² (viz Obr. 3)

Požadavky na software:

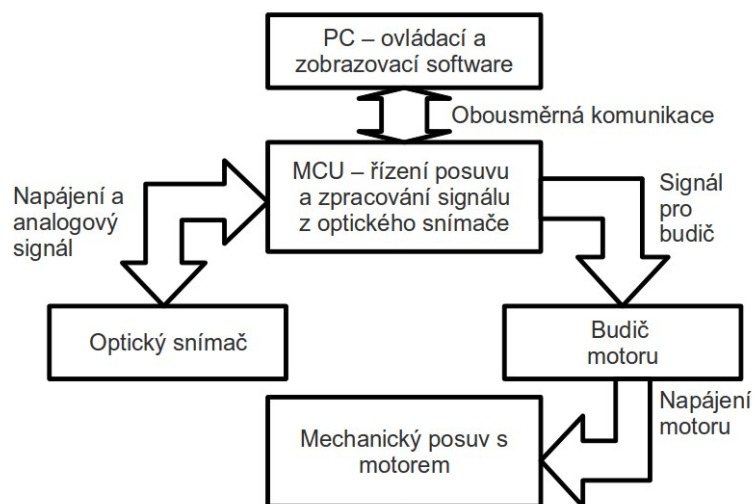
- grafické zobrazení průběhu intenzity svazku v závislosti na dráze
- číselné zobrazení maxima, minima a difference (max-min) intenzity a označení mezních hodnot v grafu
- číselné zobrazení maximální difference stranové nesymetrie a označení mezních hodnot v grafu
- možnost ukládání naměřených dat do textového souboru
- implementace v C++ s využitím knihoven Qt4 a Qwt

2 Firma Prototypa a.s. se mimo jiné zabývá i výrobou zařízení pro testování střeliva. Princip je takový, že průlet střely způsobí chvilkové zastínění snímače – jsou-li tyto snímače dva za sebou, měří se čas mezi okamžiky zastínění a z něho lze získat rychlost. Hradla s čárovými lasery se používají buď pro měření rychlosti střel, nebo ve složitější konfiguraci jako elektronický terč (viz http://www.prototypa.cz/pdf/WLS03_WTS03.pdf).



Obr. 3: Hradlo LS-04 firmy Prototypa a.s. (převzato z [11])

Ze zadání vyplývá, že měřicí zařízení bude obsahovat optické čidlo pro sběr dat, mechanický posuv, který bude čidlem pohybovat po čáře laseru a řídicí jednotku, zajišťující ovládání posuvu a komunikaci s PC. Pohyb mechanické části bude zařizovat vhodný motor, pro který je třeba sestavit budicí obvod. Rámcové schéma celého přístroje je na Obr. 4.



Obr. 4: Blokové schéma přístroje pro měření laseru s válcovou optikou

Schéma předpokládá jistá základní rozhodnutí ohledně konstrukce celého zařízení. Například místo mechanického posuvu by bylo možné instalovat velmi mnoho optických snímačů vedle sebe, což by sice ušetřilo problémy s motorem, lineárním vedením atd., ale na druhou stranu se objevuje potřeba sběru dat z několika desítek až stovek optických senzorů, což je výrazně komplikovanější, nehledě na fakt, že uživatel by byl ochuzen o možnost měnit rozlišení skenování. Rovněž signál ze snímače by bylo možno měřit například osciloskopem (lepší přístroj by dokázal data distribuovat i do firemní sítě), nicméně protože má být hotový výrobek samostatně použitelný, nepřipadá tato možnost v úvahu.

2 MOŽNOSTI A ŘEŠENÍ JEDNOTLIVÝCH ČÁSTÍ PROJEKTU

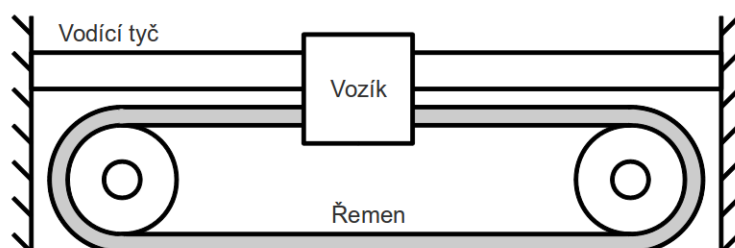
V následujícím textu budou postupně diskutovány možnosti realizace jednotlivých částí přístroje a popsáno jejich definitivní řešení. Téměř vždy existují alternativy a různé varianty, které je vhodné promyslet a upozornit na jejich výhody a nevýhody vzhledem k zadanému úkolu. Je pravda, že některé způsoby řešení jsou dány požadavky firmy Prototypa a.s., ale přesto je vhodné problém více rozebrat, protože situace se může časem změnit a vypracovaný materiál bude mít do budoucna větší hodnotu, jak z hlediska případných úprav měřiče čárového laseru, tak i jako inspirace při vývoji podobných zařízení.

2.1 Mechanická konstrukce

Vzhledem k tomu, že měříme intenzitu světla čárového laseru a hodláme užít jednoho snímače, je zřejmé, že bude třeba realizovat pohyb měřicího přípravku v jedné ose. Tato problematika spadá do oblasti strojního inženýrství, nicméně naše úloha není v tomto směru příliš obtížná (máme relativně nízké nároky) a mělo by být možné ji splnit bez hlubokých odborných znalostí.

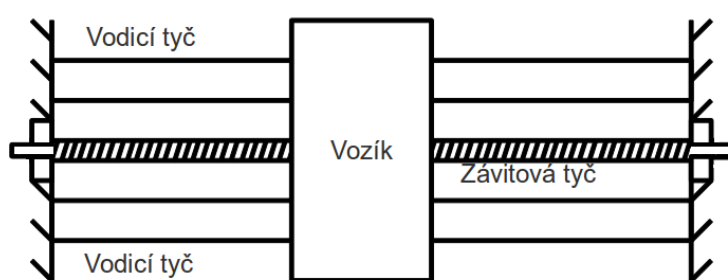
Oporu posuvného zařízení bude tvořit hliníkový profil vhodných rozměrů, abychom splnili podmínku možnosti uchycení na místo budoucího snímače, předepsanou firmou Prototypa. Posuvné ústrojí, motor, optický snímač a desky s elektronikou budou poměrně lehké a proto není třeba řešit zpevňování profilu z důvodu malé nosnosti.

Samotný posuv může být realizován vícero způsoby. Obvyklá metoda používaná v přístrojích kde není nutná velká tuhost mechanické soustavy zahrnuje vedení (obvykle se skládá z jedné nebo dvou kovových tyčí), vozík nesoucí posouvané zařízení, který je po nich posouván a řemen, který je k němu připevněn (viz. Obr 2.1). Pohon obvykle zajišťuje krokový nebo stejnosměrný motor. Tato konfigurace se běžně vyskytuje ve spotřební elektronice, například tiskárnách, skenerech, kopírkách atd.



Obr. 5: Schématické znázornění lineárního posuvu s řemenem (pohled z boku)

Dále lze lineární posuv realizovat pomocí šroubovice. Velmi často se tato metoda používá u CNC strojů a během let vývoje dosáhla vynikajících vlastností. Mechanika opět zahrnuje pevné vedení (obvykle jedno nebo dvě, ale někdy i více), šroubovici, vozík a pro pohon nejčastěji krokové motory nebo serva. Princip spočívá v tom, že ve vozíku je napevno zabudovaná matka a otáčející se závitová tyč způsobuje posun podobně jako u šnekového převodu. Při montáži je nutné dát pozor na uložení závitu, neboť je namáhán především axiální silou a proto je třeba zvolit vhodná ložiska. Radiální silou by neměl být namáhán pokud možno vůbec, tu by měly nést vodící prvky k tomu konstruované. Zjednodušené schéma je nakresleno na Obr. 6.



Obr. 6: Schématické znázornění lineárního posuvu se závitovou tyčí (pohled shora)

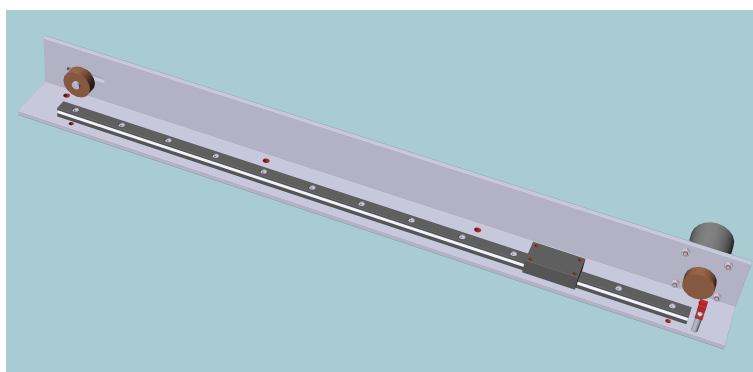
Nejjednodušším řešením je použití klasické tyče s metrickým závitem, ovšem matky mají velkou vůli a přesnost není dostatečně dobrá. Rovněž kluzné vlastnosti materiálu nejsou ideální a tvrdost povrchu bývá malá, takže by brzy došlo k opotřebení. Toto není dáno nekvalitním zpracováním, ale zcela jiným účelem, což je spojování materiálu. V nouzi a při malých nárocích na přesnost a opakovatelnost měření by se tato možnost dala použít, ale dle mého názoru by se jednalo o nemístné šetření na nesprávném místě.

Mnohem lepší možností jsou tzv. trapézové závity. Vyrábějí se speciálně pro mechanické posuvy a tomu také odpovídají vlastnosti materiálu a dobrá přesnost. Další výhodou je, že při stejném průměru mají větší stoupání než závity metrické, což umožňuje dosáhnout rychlejšího posuvu (stěžejní hlavně pro krokové motory které z principu mohou pracovat pouze na nízkých otáčkách). Lze je najít jako součást mnoha dílenských nástrojů (svěráky), ale i v levnějších CNC nebo obráběcích strojích. Cena je oproti běžným závitovým tyčím s metrickým závitem při stejném průměru zhruba trojnásobná, ale vlastnosti jsou výrazně lepší.

Pro potřeby přesné strojní výroby existují ještě kuličkové šrouby. Uplatňují se hlavně v kvalitních CNC strojích, kde zajišťují převod z rotačního pohybu na posuvný s vysokou účinností a minimální vůlí. Princip je trochu podobný ložisku. V matici jsou uloženy kuličky, které při šroubování volně klouzají drážkou závitu. Tření je tedy

omezeno na minimum a precizní provedení umožňuje nastavit minimální vůli. Nároky na montáž jsou tím pádem výrazně vyšší než v předchozích případech. Cena je úměrná kvalitě, tedy velmi vysoká.

Jak je vidět z Obr. 5 a Obr. 6 u lineárního posuvu není důležitý jen prvek zprostředkující pohyb (řemen nebo závitová tyč), ale také vedení vozíku. Právě na něm totiž spočívají působící síly, které brání volnému pohybu. Obvykle se jedná například o odpor kladený frézovaným materiálem, síly vznikající setrvačností hmoty vozíku při prudkých změnách rychlosti a samozřejmě i klidová hmotnost celé posouvané soustavy. Běžné řešení, dostačující v mnoha případech, jsou vodící tyče. Jedná se o obyčejnou kulatinu s úpravou pro větší tvrdost (v průběhu chodu stroje by mělo docházet k minimálnímu opotřebení). Krátké, nebo málo zatížené vedení se může upevnit jen na koncích, pro větší tuhost je nutné zajistit alespoň bodové podepření, ideální je však podpora v celé délce. Mnohem luxusnější řešení je tzv. lineární vedení. Je velmi přesné, při posunu má malý třecí odpor a snese mnohem větší zatížení než vedení tyčové. Obsahuje vodící kolejnici, rolnu a případně oběhové kuličky, zlepšující kluzné vlastnosti. Používá se pro velmi namáhané posuvy náročné na přesnost, tedy v oblasti CNC obráběcích strojů apod. Pro náš přístroj není lineární vedení nezbytné a stačilo by výrazně levnější řešení pomocí vodících tyčí, protože vozík s čidlem představuje jen malou zátěž a ani dosahované rychlosti nebudou příliš vysoké.



Obr. 7: Zjednodušený model mechaniky

Při návrhu mechaniky jsem se snažil klást důraz na jednoduchost výroby. Výsledkem je konstrukce na Obr. 7, jejímž základem je hliníkový L profil. Tmavě šedou barvou je zobrazeno vedení a motor, ozubená kola jsou naznačena hnědě. Celé zařízení je možné přišroubovat k hradlu z Obr. 3 pomocí čtyř šroubů, optický snímač bude upevněn na boku vozíku. Daní za jednoduchost této koncepce jsou poněkud horší mechanické vlastnosti.

Vzhledem k okolnostem vývoje, tedy snaze využít v co největší míře součásti, které už ve firmě jsou, se naskytla možnost nasadit lineární vedení. Jedná se o poměrně subtilní kus, kolejnice má rozměr pouhých 12x15 mm na průřezu. Navzdory malé velikosti drží vozík velmi dobře, vůle je minimální a nepochybně se jedná o

nejkvalitnější součást celého mechanického systému. Ve vozíku jsou připraveny čtyři montážní otvory, které použiji pro připevnění desky se senzorem a napojení na řemen. Dále bude na vozíku výstupek pro optickou závorku (vyznačena červeně), která je nezbytná pro bezpečné a opakovatelné nastavení počátku dráhy. Zde je třeba upozornit na fakt, že pokud vypneme motor okamžitě při změně signálu z optické závorky, může dojít k hazardnímu stavu. Jakékoli drobné posunutí vozíku, způsobené například pružností převodu, může mít za následek další změnu signálu. Řešením je nechat vozík popojet ještě o přesně stanovenou vzdálenost, která sice nezpůsobí havárii, ale zajistí stabilní stav soustavy.

Posuv je realizován pomocí řemenu (viz. Obr. 5). Jedno ozubené kolo je nalisováno přímo na ose motoru, druhé se otáčí na čepu usazeném v oválném otvoru. Důvodem pro oválný otvor je napínání řemenu, který má určitou pružnost a tím pádem je dobré mít jistý malý prostor, v němž lze jeho napětí měnit. Vhodnější řešení by bylo uložit hřídel s kolem na obou stranách do ložisek a napínání vyřešit robustnějším způsobem, samozřejmě za cenu větší složitosti mechaniky. Přestože v průběhu návrhu zařízení jsem vytvořil plány tohoto mechanismu, nakonec právě pro větší složitost nebyly využity. Typ řemenu jsem volil vhodný pro malé zátěže s roztečí zubů 5 mm. Kola mají 20 zubů, což usnadňuje výpočet dráhy v závislosti na otáčení motoru (100 mm/ot.).

2.2 Motor

Další důležitou součástí ležící mezi mechanikou a elektronikou je motor. Vyrábí se celá řada různě konstruovaných elektromotorů, které jsou všechny více či méně hojně využívány. Výběr je tedy veliký, přesto nám ale příliš možností nezůstává. Pro naši konstrukci nejsou vhodné střídavé motory, které se obtížně řídí a pro alespoň základní regulaci potřebují minimálně frekvenční měnič. Navíc se tyto stroje stavějí spíše pro střední a velké výkony. Pro dané účely se obvykle používají malé stejnosměrné motorky, krokové motory nebo servomotory.

Malé stejnosměrné motory jsou obvykle konstruovány s permanentním magnetem ve statoru a vícepólovým komutátorem. Motor lze snadno řídit, změna směru otáčení se provede přepólováním napájecích kontaktů a samotné otáčky lze regulovat pomocí pulsně šířkové modulace (PWM – bude vysvětleno v následující kapitole). Nevýhoda tohoto způsobu řízení spočívá v tom, že při nízkých otáčkách je malý i kroutící moment a motor navíc není zdaleka využit. Používá se tedy mechanická převodovka, která může být i přímo součástí motoru. Otáčky naprázdno se mohou, v závislosti na typu motoru pohybovat v rozsahu od několika set do cca dvaceti tisíc za minutu, při zatížení poklesnou. Běžně se vyskytují v široké škále spotřební elektroniky od dětských hraček přes bílou a kancelářskou techniku až po ruční nářadí. Výhodou je jejich cena a snadné řízení, nevýhodný je především komutátor (ztráty energie, opotřebení kontaktů) a pokles výkonu při snížení otáček pomocí PWM. Tento typ motoru by pro naše účely byl

použitelný, bylo by ale potřeba zajistit zpětnou vazbu pro určení polohy (např. enkodér³) a také vhodnou převodovku.



Obr. 8: Malý stejnosměrný motor bez integrované převodovky

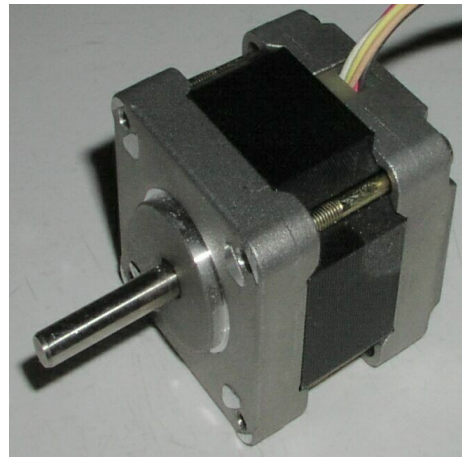
(převzato z [12])

Výrazně lepší alternativou pro tento projekt je krokový motor. Permanentní magnety jsou na rotoru a stator je tvořen většinou osmi cívkami, jak je ukázáno na Obr. 9 (zde záleží na počtu fází motoru, v závislosti na konstrukci jich může být i jiný počet, ale nejčastější je právě osm cívek). Drážkované pólové nástavce na statoru mají stejné rozestupy jako magnety na rotoru a právě tímto je dán počet kroků na otáčku – jedna z nejdůležitějších charakteristik tohoto typu motoru. Časté hodnoty jsou 48, 100 a 200 [k./ot.]. S krokovým motorem nelze dosáhnout vysokých otáček, je možné se dostat řádově na jednotky za sekundu, avšak při téměř konstantním krouticím momentu. Celkově je robustnější a při stejné hmotnosti eventuálně objemu má menší výkon než běžný DC motor. Uplatnění je všude tam, kde není na závalu větší hmotnost a kde je třeba přesně kontrolovat pozici hřídele. Při vhodném řízení a zátěži není nutné řešit zpětnou vazbu polohy, protože ji lze bezpečně rekonstruovat z ovládacích impulsů. Problém nastává na vysokých otáčkách a při velkém zatížení, kdy může motor začít ztrácet kroky, což vede k nespolehlivosti řízení polohy. V tomto režimu není vhodné krokový motor vůbec provozovat.

3 Enkodér je označení pro senzor polohy. Obvykle se jedná o kotouček pevně uchycený na hřídeli, který v sobě má paprskovitě od středu úzké šterbiny. Při otáčení prochází optozávorou, na jejímž výstupu jsou impulsy, jejichž frekvence je úměrná otáčkám. Blíže viz. [1].



Obr. 9: Stator krokového motoru



Obr. 10: Krokový motor

(oba obrázky převzaty z [13])

Precizně řízené stejnosměrné i střídavé pohony s integrovanou elektronikou pro snímání polohy se nazývají servomotory. Jsou nasazovány do nejnáročnějších aplikací v průmyslu, kde jsou vysoké nároky na výkon, přesnost a spolehlivost. Existují serva pracující třeba jen v mezích natočení 0° - 270° , která se používají například k ovládání velkých ventilů, nicméně většina může pracovat bez omezení natočení. Lze nastavovat přesnou polohu (natočení) hřídele, otáčky a dále je zde obvod na udržování konstantního krouticího momentu. Pro daný účel se jedná o zbytečně kvalitní a především zbytečně drahé řešení.



Obr. 11: Servomotory a bloky obsahující řídicí elektroniku (převzato z [14])

V předchozím textu vůbec nebyly zmíněny lineární motory. Mohou pracovat jak na elektrickém, tak i na pneumatickém, nebo hydraulickém principu a kombinují v sobě pohon a zároveň kompletní mechaniku posunu. Zdánlivě se jedná o výhodné řešení, ale provozovat hydraulický píst v měřicím systému je nemyslitelné a elektrické lineární motory nejsou snadno dostupné a používají se pro úplně jiné účely. Celkově je tedy pro danou konstrukci výhodnější zvolit některý z výše uvedených přístupů.

Vzhledem ke skutečnostem uvedeným výše jsem se rozhodl pro použití krokového motoru. Jedná se o robustní model (SX23-1012) firmy Microcon s kroutícím momentem 1,2 Nm. Původně se zdálo že pohon bude zbytečně předimenzován, ale zjednodušení v mechanické části se způsobila větší tření hřídele a ozubeného kola (ložiska zde citelně chybí). Další problém je spojení vozíku s řemenem, které není v ose pohybu. Z toho plyne, že síla nepůsobí na vozík ve směru kolejničky, ale šikmo na ni, což vyúsťuje ve zvětšení smykového tření. Silný motor je tedy na místě a při nominálním napájení mechanickou soustavu bez problémů utáhne.

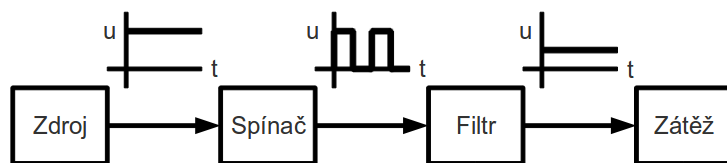
2.3 Budič motoru

Pokud má motor být skutečně řízen, není možné ho ovládat pouze tlačítkem typu START/STOP. Tento způsob je mnohdy využíván, ale jedná se o aplikace, kde není nutné znát natočení hřídele, nebo regulovat rychlost. Příkladem mohou být vrtačky, větráky, fény vysavače a podobně, ale je pravdou že i u těchto spotřebičů se někdy vyskytují jednoduché regulátory nabízející uživateli vyšší komfort.

Měřič čárového laseru musí být schopen reprodukovatelně nastavovat polohy snímacího senzoru, z povahy věci tedy vyplývá, že je třeba znát a dokázat nastavit přesné natočení hřídele motoru. Tato problematika je velmi široká a komplikovaná a ve špičkové kvalitě je provedena u výše zmíněných servomotorů. Pro naše účely ovšem stačí jednodušší metody – pro DC motory pulsně šířková modulace a pro krokové motory rozeberu základní druhy zapojení a metody řízení.

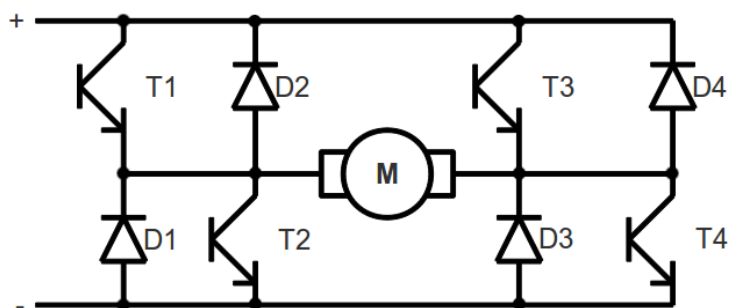
PWM⁴ je metoda řízení výkonu používaná v mnoha různých zařízeních, zvláště měničích a zdrojích s vysokou účinností ($\eta \rightarrow 1$). Při vyšších výkonech je použití rezistoru velmi nevhodné, protože součástka splňující požadavky na ní kladené je rozměrná, drahá a především se energie neužitečně vyzáří ve formě tepla. PWM funguje na principu rychlého připojování a odpojování zdroje napětí, takže do zátěže se dostává energie jen impulzně a na střídě impulsů záleží, kolik jí bude. Ke ztrátám dochází pouze při spínání.

4 Zkratka pochází z anglického spojení "Pulse Width Modulation", což znamená právě pulzně šířková modulace.



Obr. 12: K vysvětlení principu PWM řízení výkonu

Na Obr. 12 je schematicky naznačena úprava napájecího napětí na požadovanou velikost. "Zdroj" je libovolný tvrdý zdroj napětí ze kterého lze pulzně odebírat proud. "Spínač" je obvykle tvořen párem tranzistor – dioda. Při použití jednoho tranzistoru a jedné diody můžeme získat pouze měnič pracující v prvním kvadrantu, čili motor může pracovat pouze jako spotřebič a může se točit jen na jednu stranu. Přidáme-li další větev tranzistor – dioda, umožníme motoru pracovat i v generátorovém režimu a při použití čtyř větví vznikne tzv. H-můstek umožňující řízení směru i otáček, eventuálně může přenášet energii zpět do zdroje, pokud motor funguje jako generátor (viz. Obr. 13). "Filtr" zaručuje vyrovnaní impulzního průběhu opět na stejnoměrný, obvykle je tvořen cívku a kondenzátorem. V případě řízení DC motoru se nezapojuje, protože indukčnost vinutí má dostatečné filtrační vlastnosti sama o sobě. "Zátěž" je v zde stejnosměrný motor.

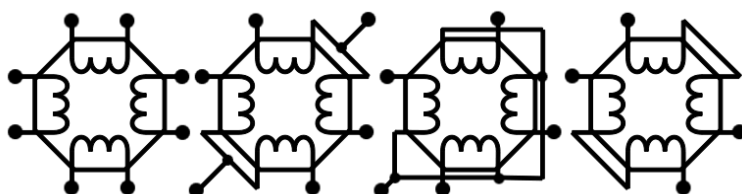


Obr. 13: Zapojení H-můstku

H-můstek se vyrábí i v integrované formě, kde jsou rovněž vyřešeny obvody v bázích tranzistorů a všechny čtyři větve lze řídit TTL logickým signálem přímo z mikrokontroléru. Jako příklad lze uvést obvody L293, L298 a pro větší proudy MC33886.

Zpětnou vazbu s informací o natočení lze získat například pomocí enkodéru jak bylo uvedeno v kapitole o motorech. V moderních servopohonech jsou senzory umožňující rozeznat až několik set tisíc poloh.

Krokové motory, alespoň co do natočení, se ovládají snadněji než klasické DC motory. Je to dáno jejich konstrukcí, kdy existují pevné pozice – kroky, v nichž lze rotaci zastavit a následně pozici udržet i proti silnému momentu na hřídeli. Otáčení probíhá tak, že ve správném sledu spínáme statorové cívky a ty pak přitahují magnety na rotoru. Obvyklá topologie jak je uvedena na Obr. 14 obsahuje fyzicky osm cívek, ale vždy dvě jsou zapojeny společně, takže dále budeme mluvit pouze o čtyřech cívkách. I když mají motory stejnou vnitřní konstrukci, mohou se lišit počtem vývodů. Můžeme se setkat s typy, z nichž vede osm drátů, to znamená, že jsou k dispozici oba konce všech čtyř cívek, další možnost je šest vývodů (vždy dvě cívky v sérii, přístupné kraje a střed), pět vývodů (všechny čtyři cívky jedním koncem spojeny) a někdy pouze čtyři vodiče (dvě cívky v sérii, vyvedeny pouze konce).

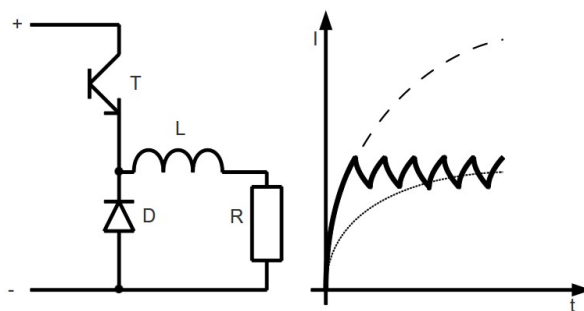


Obr. 14: Čtyři možnosti zapojení vývodů krokových motorů

Krokový motor lze v nejprimitivnějším případě řídit pouze postupným připojováním cívek k napájecímu zdroji. Tento způsob provozu je unipolární (máme jen jedno napájecí napětí), jednofázový (vždy pracuje jen jedna cívka) a máme plný krok, čili motor přeskakuje z pozice na pozici po celých krocích. Pokud potřebujeme vyšší krouticí moment, můžeme zvolit bipolární napájení (v případě osmivývodového motorku si pro tento způsob řízení lze vystačit i s napájením jedné polarity). Princip spočívá v tom, že protilehlé cívky spínáme tak, aby generovaly opačné magnetické pole a výsledný krouticí moment je pak větší, ovšem za cenu dvojnásobné spotřeby. Při dvoufázovém způsobu řízení spínáme vždy dvě sousední cívky tak, že pracují společně a $\sqrt{2}$ krát zvyšují krouticí moment, spotřeba je opět dvojnásobná.

Počet kroků na otáčku uvedený v katalogu zdaleka není nejjemnější členění pohybu jakého lze s pomocí krokového motoru dosáhnout. Kombinací jednofázového a dvoufázového řízení se dá docílit polovičního kroku. Nejprve sepneme jednu cívku (zafixování pozice), pak ještě další sousední (posun o polovinu kroku) a první cívku vypneme – dokončení kroku. Nevýhodou je, že po celou dobu není konstantní krouticí moment, ale to většinou není na závadu. Dalšího zjemnění se dá dosáhnout pomocí mikrokrokování, což obnáší nastavování proudů cívkami tak aby se rotor posouval po ještě drobnějších úsecích a tím pádem bylo otáčení plynulejší a měli jsme na výběr více poloh. Průběhy proudů v cívkách pak se pak blíží tvaru funkce sinus.

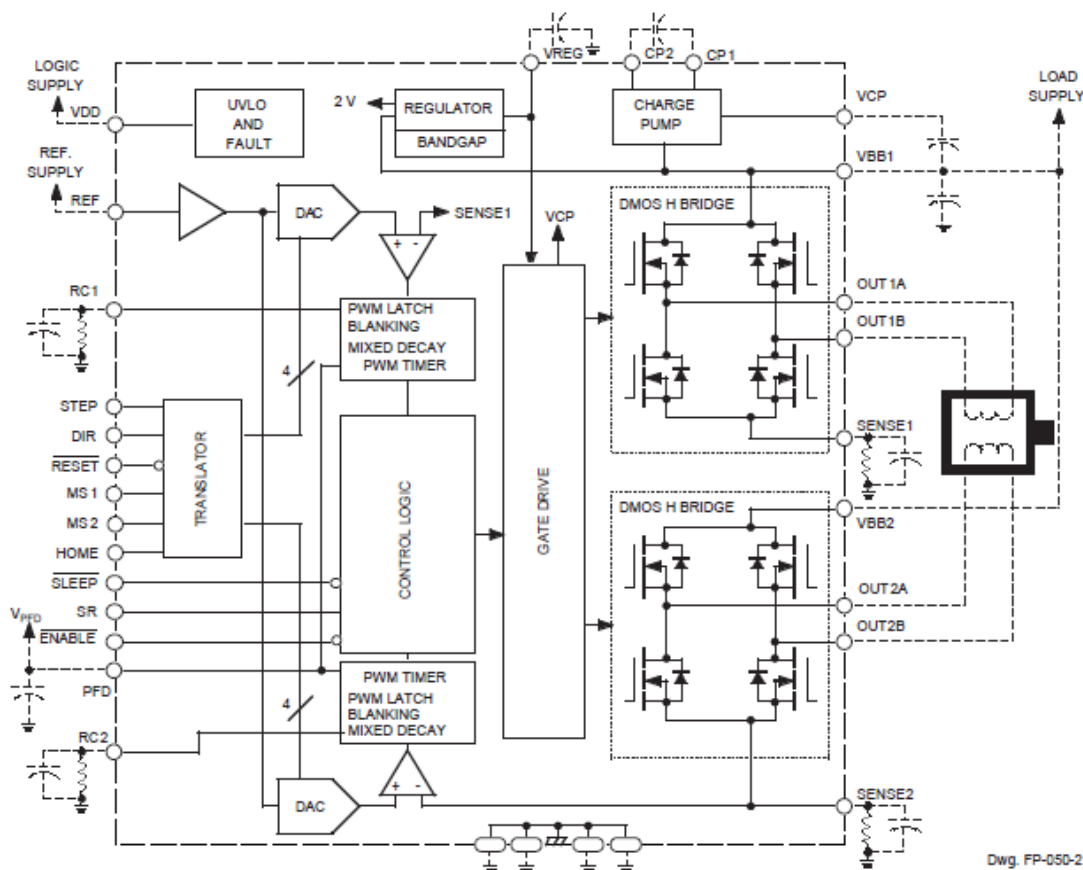
Zatím jsme řešili pouze kdy a do jaké cívky pustit proud, aby se motor točil s potřebným krouticím momentem a dostatečně plynule. Protože však vinutí tvoří z obvodového hlediska sériovou kombinaci rezistoru a indukčnosti, nemění se proud vinutím skokově, ale proběhne přechodný děj jako u každého setrvačného članku prvního řádu s časovou konstantou $T = L / R$. Protože proud se mění pozvolna, není ani krouticí moment hned takový, jaký by byl v ustáleném stavu a tak při rychlém spínání této hodnoty ani nestihne dosáhnout, což vede k zásadnímu poklesu momentu. Tento stav není nijak výjimečný a nastává již při několika málo otáčkách za sekundu. Pokud chceme dosáhnout vyšší rychlosti, je třeba zkrátit dobu, za jakou dosáhne proud v cínce požadované hodnoty. Toho lze dosáhnout tím, že připojíme motor na zdroj s vyšším napětím a do série s cívkou vložíme rezistor, který pomůže zkrátit časovou konstantu a udržet proud v mezích bezpečného provozu. Nevýhoda tohoto řešení je v tom, že na odporu zbytečně ztrácíme energii. Mnohem elegantnější je použít step-down měnič, neboli chopper (viz. Obr. 15). Krokový motor je opět připojen na zdroj s vyšším napětím a do vinutí je proud pouštěn impulzně tak, že nestihne dosáhnout své maximální hodnoty (která už by byla pro motor fatální) ale při dosažení žádané hodnoty je napájení odpojeno a čeká se, dokud průběh neklesne pod dolní povolenou mez. Na žádanou hodnotu se díky vyššímu napětí dostaneme rychleji než při použití napětí nízkého. Graf na Obr. 15 ukazuje teoretický průběh proudu při připojení na zdroj s obvyklým pracovním napětím (tečkovaně), s vyšším napětím (čárkovaně) a tučně je vyznačen průběh při pulzním řízení. Tento způsob buzení zátěže velmi úzce souvisí s problematikou PWM probíranou výše.



Obr. 15: Chopper pro řízení krokového motoru a průběh proudu ve vinutí

Chopper lze realizovat pomocí diskrétních součástek, nicméně pro menší výkony je výhodnější použít integrované řešení, které obsahuje veškerou řídicí logiku, analogovou část pro hlídání velikosti proudu a umožňuje použít mikrokrokování. Obvody mají buď vyvedeno dostatek pinů pro řízení, nebo je využita sériová sběrnice, např. I²C nebo SPI,

díky čemuž lze ovládat z jednoho mikrokontroléru třeba šestnáct motorů. Příkladem je použitý obvod A3977, který má redukováný počet ovládacích pinů a lze nastavit mikrokrokování až 1/8.



Obr. 16: Blokové schéma obvodu A3977 (převzato z [9] str. 3)

Na Obr. 16 vidíme schematicky znázorněný obvod A3977, který obsahuje vše podstatné pro čtyřvodičové řízení jednoho krokového motoru. Výkonovou část tvoří výše popsané H-můstky, zde ovšem realizované pomocí moderní technologie DMOS. Ke snímání proudu vinutím slouží odpory SENSE1 a 2. Výrobce nám dává možnost osadit rezistory dle vlastního výběru, což přispívá k širším možnostem využití obvodu. Velikost odporu se volí tak, aby úbytek na něm nepřesáhl 0,5V (dle doporučení výrobce). Pro nastavení mikrokrokování slouží vstupy MS1 a MS2. Volbou některé ze čtyř kombinací zvolíme dělení 1, 2, 4, nebo 8 na jeden krok. Vstup DIR přirozeně slouží pro určení směru otáčení. Náběžná hrana na pinu STEP způsobí inkrementování (dekrementování podle stavu DIR) polohy o jednu hodnotu. Skutečná velikost inkrementu je rovna velikosti kroku dělené koeficientem mikrokrokování. Analogový vstup REF lze použít pro nastavení maximálního proudu cívkami motoru a regulovat

tak jeho spotřebu, potažmo výkon. Řídící logika pracuje na principu PWM a zcela automaticky řídí oba H-můstky, včetně pokročilých metod ochrany spínacích prvků.

2.4 Řídící elektronika

Složitější zařízení, která mají vykonávat nějakou komplexnější činnost jsou obvykle řízena mikrokontrolérem, průmyslovým počítačem nebo třeba PLC⁵. Jelikož měřič intenzity paprsku čárového laseru jistě spadá do této kategorie, je třeba se rozhodnout, jakou řídící elektroniku zvolit. Vzhledem k nárokům na projekt není třeba plýtvat prostředky na příliš výkonnou techniku a bohatě postačí malý mikrokontrolér.

Výrobou MCU⁶ se zabývá mnoho světových firem, například Atmel, Freescale, Microchip a další. Obvykle se jedná o RISC⁷ osmibitové procesory, ale objevují se i šestnáctibitové (řada MSP430 od Texas Instruments). Cenově se MCU pohybují v řádu desítek až stovek korun, což z nich dělá ideální řešení pro levné aplikace nevyžadující velkou výpočetní kapacitu. Výkonnější možností jsou procesory s architekturou ARM, ale těm se zde nebudu věnovat, protože jejich kvality zdaleka nejsou v zadaném projektu potřeba a návrh by se zbytečně zdražil a zkomplikoval.

Nejprve je třeba formulovat požadavky, které by měl mikrokontrolér splňovat. Z hlediska spolehlivosti a zjednodušení návrhu by bylo dobré, aby bylo co nejvíce potřebných součástí integrováno přímo v pouzdře s mikroprocesorem. Je zřejmé, že bude potřeba paměť pro program (obvykle typu FLASH, velikost stačí v řádu kilobajtů) a dále operační paměť (v MCU je běžně SRAM, velikost bývá zhruba o řád menší než paměť programu). Dále je nutné aby disponoval dostatečným počtem vstupně výstupních linek pro řízení motoru, čtení informací ze senzoru a komunikaci (přibližný odhad potřebného množství lze učinit pomocí rámcového schématu přístroje na Obr. 4).

Vzhledem k tomu, že levné varianty měření intenzity světla mají vesměs analogový výstup, bude potřeba analogově číslicový (AD) převodník. V mikrokontrolérech se běžně AD převodník vyskytuje, parametry sice nejsou nikterak oslnivé, ale pro běžné aplikace je bez problémů použitelný. Největší omezení se týkají rychlosti převodu a rozlišení, což v našem případě nevádí, protože nejpomalejší z celé soustavy bude zřejmě mechanický posun a chceme odhalovat nestejnomyšlnosti intenzity světla v řádu jednotek procent, čili osmi nebo desetibitový AD převodník bude bohatě stačit.

Protože zařízení musí komunikovat s okolím, je vhodné, když je v mikrokontroléru hardwarově implementováno nějaké sériové komunikační rozhraní, nejlépe takové, které lze snadno propojit s PC (podrobně bude rozebráno dále). Se sériovou komunikací

5 Zkratka PLC znamená "Programmable Logic Controller", v češtině se používá výraz

"programovatelný automat". Jedná se o automatizační zařízení určené do průmyslu, které realizuje vysoce spolehlivé řízení v reálném čase.

6 MCU je anglická zkratka označující mikrokontrolér.

7 RISC je označení pro mikroprocesory s redukovanou instrukční sadou.

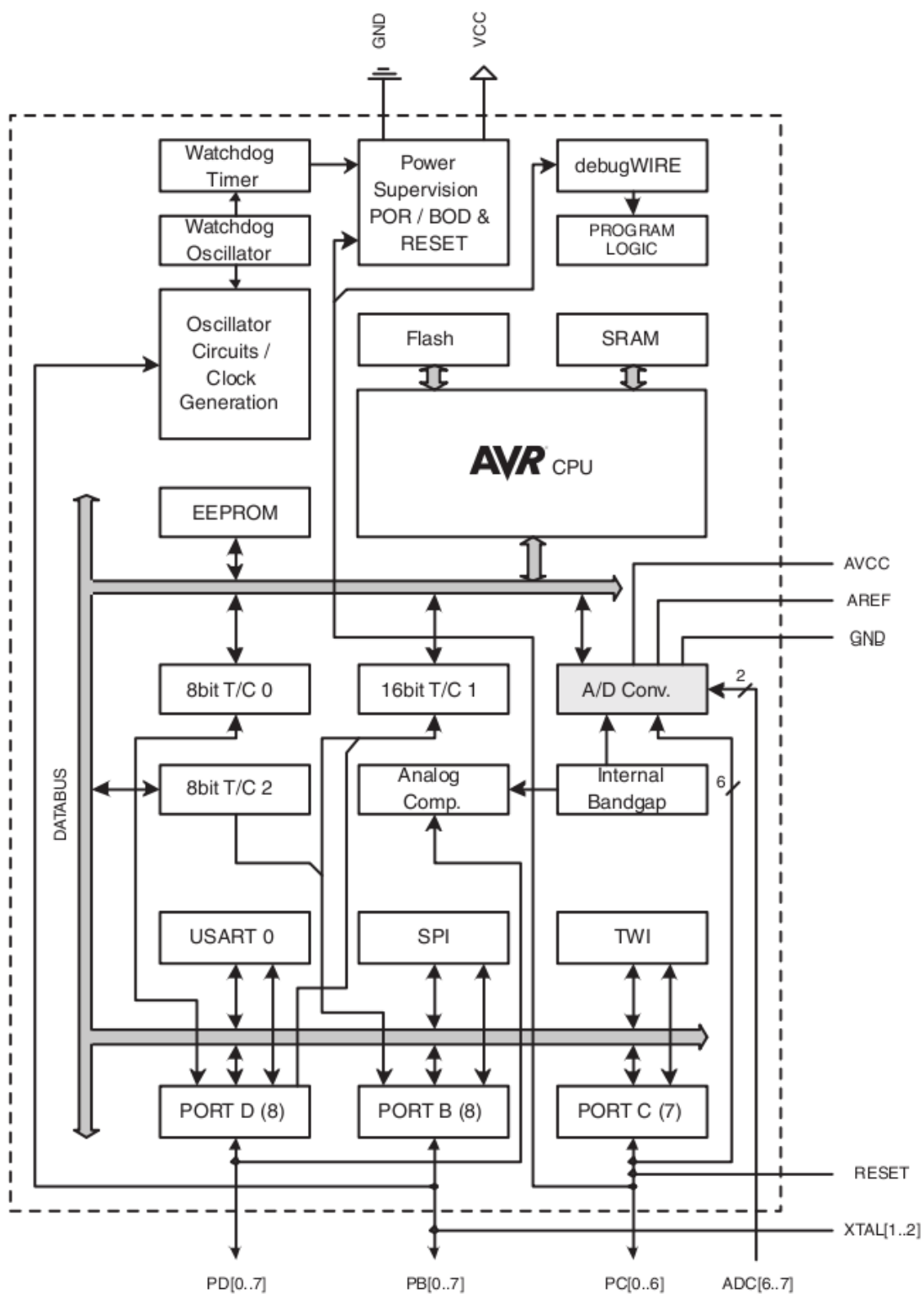
úzce souvisí volba frekvence na níž mikrokontrolér poběží. Obvyklé hodnoty se pohybují v řádu jednotek až desítek MHz.

Požadavky shrnuté v předešlých třech odstavcích v dnešní době není obtížné splnit, protože výrobci s podobným použitím svých produktů počítají a mikrokontroléry jsou tedy po těchto stránkách náležitě vybaveny. Výrobců je mnoho a každý má několik desítek až stovek jednotlivých modelů, což výběr poněkud znesnadňuje. V Prototypě používají pro podobné účely mikrokontroléry firmy Atmel, proto zde nebudu probírat produkty ostatních výrobců, ačkoli rozhodně mají co nabídnout.

MCU řady AVR firmy Atmel jsou ve světě velmi rozšířené a proto lze o nich nalézt mnoho informací. Podpora výrobce je velmi dobrá, katalogové listy kvalitně zpracované a dokonce je poskytováno vývojové prostředí včetně simulátoru skutečného čipu zdarma. Programátory lze zakoupit přímo od Atmelu (existuje několik variant), ale vyrábí je i mnoho jiných firem a nakonec není problém si podle návodů z internetu sestavit i programátor vlastní. K dispozici jsou samozřejmě i vývojové kity a na webu se nachází mnoho volně dostupných konstrukcí (dobré i poněkud horší kvality). Vývojové prostředky jsou dostupné i na poli open-source a Linuxu (avr-binutils, gcc-avr, avrdude a další), což je vynikající a bohužel, spíše výjimečné.

Při pohledu na Obr. 17 vidíme strukturu typického mikrokontroléru řady AVR. V dolní části jsou tři porty, které v sobě zahrnují 23 vstupně – výstupních pinů. Dále lze využít modulů pro sériovou komunikaci – USART, SPI a TWI (ve skutečnosti se jedná o klasickou sériovou sběrnici I2C, ovšem z jakýchsi licenčních důvodů firma Atmel používá vlastní označení TWI). Všechna tato rozhraní je možné provozovat naráz, jsou na sobě zcela nezávislá. Integrovaný AD převodník dosahuje rozlišení 10 bitů a má šest multiplexovaných vstupů. Velmi významná součást vybavení mikrokontroléru jsou časovače. Jejich použití je široké, prostým měřením časových intervalů počínaje a generováním PWM signálu konče. Paměti, o kterých bylo zběžně pojednáno již výše jsou samozřejmě také přítomny, stejně jako obvody řízení hodinového signálu a sledování napájecího napětí.

Výčet vlastností z předchozího odstavce jasně ukazuje, že pro náš úkol je v MCU již vše podstatné připraveno. Primárně se jedná o komunikační jednotku USART, která zprostředkuje spojení s PC, dále časovač, pro plynulé řízení krokového motoru a samozřejmě AD převodník.

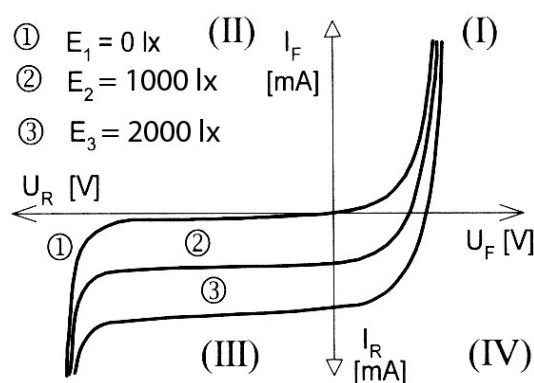


Obr. 17: Blokový diagram mikrokontroléru Atmega168 (převzato z [5] str. 5)

2.5 Optický senzor

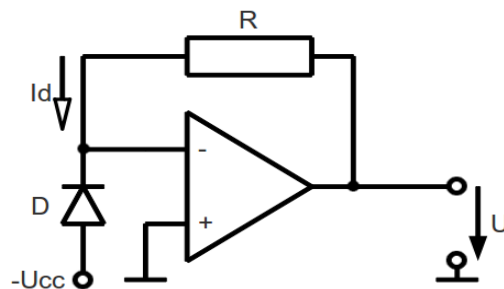
Intenzitu světla lze snímat nejrůznějšími prostředky. Dnes se v maximální míře využívají polovodičové prvky a pro jiné prostředky (např. fotonásobiče) zbývají už jen velmi speciální aplikace. Vyrábějí se fotorezistory (bez PN přechodu) a fotodiody a fototranzistory (mají jeden, popřípadě dva PN přechody). Pro naši aplikaci by byly použitelné všechny tři součástky (samozřejmě ne úplně všechny typy), nicméně dále proberu pouze aplikaci fotodiod, jakožto zřejmě nejčastějšího řešení.

Fotodioda je v zapojeních orientována v závěrném směru. Měří se proud, který jí protéká, protože právě ten je (s dobrou přesností) přímo úměrný intenzitě dopadajícího světla. Vše je zřejmé z voltampérové charakteristiky na Obr. 18.



Obr. 18: Voltampérová charakteristika fotodiody pro různé intenzity osvětlení (převzato z [15])

Měření je obvykle realizováno pomocí kvalitního operačního zesilovače (OZ), zapojeného jako převodník proudu na napětí. Protože proud je v závislosti na osvětlení řádově v nanoampérech až mikroampérech, je třeba volit OZ s minimálním vstupním proudem, tedy takový typ, který má na vstupu tranzistory řízené polem. Vstupní odpor je pak v oblasti $10^{10} - 10^{12} \Omega$, což zaručí, že OZ neovlivní měřený proud. Principiální schéma je na Obr. 19.



Obr. 19: Schéma zesilovače pro fotodiodu

Výstupní napětí U závisí přímo úměrně na proudu I_d a ten zase na intenzitě osvětlení. Můžeme tedy napsat rovnici:

$$U = RI_d = \Phi SkR$$

kde Φ je intenzita světla, S je aktivní plocha diody a k je převodní konstanta mezi dopadajícím světlem a výstupním proudem.

Konstanty S a k závisejí na typu diody, intenzita světla Φ bude v určitém rozsahu proměnlivá a velikost odporu R můžeme volit. Obvyklá hodnota bývá v jednotkách megaohmů, což většinou stačí k dosažení lehce měřitelného napětí U . Pokud by však Φ bylo malé, není vhodné dále zvyšovat zpětnovazební odpor a je třeba zařadit na výstup standardní neinvertující zesilovač. Přesnou hodnotu odporu R je třeba experimentálně určit, stejně jako zesílení případného přídavného zesilovače. Cílem je získat napětí v intervalu 0-5 V, které je možné přivést přímo na vstup AD převodníku v MCU.

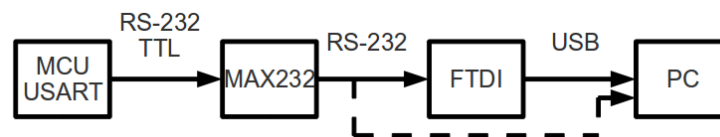
Z hlediska návrhu i realizace je jednodušší, pokud je veškerá elektronika na jedné společné desce. Zde by to znamenalo vést slabý signál od fotodiody zhruba metr dlouhým vodičem až na desku. Přístroj bude zřejmě provozován v téměř laboratorních podmínkách, kde nehrozí významné rušení, takže i tato varianta přichází v úvahu, zvláště pokud použijeme např. koaxiální kabel.

Pro případ, že by se předchozí řešení ukázalo nevhodné, bude zesilovač muset být umístěn na vozíku mechanického posuvu, dobře odstíněn a přívody napájení blokovány keramickými kondenzátory (100 nF). Analogový signál 0-5 V pak bude na řídicí desku veden kroucenou stíněnou dvoulinkou spolu s analogovou zemí. Tato opatření by měla omezit vliv rušení na přijatelné minimum.

2.6 Komunikace s PC

Komunikace s PC je velmi důležitou součástí přístroje, protože právě skrze ní je celé měření ovládáno, nastavováno a zjištěné hodnoty vráceny zpět k dalšímu zpracování. Podmínkou dobré využitelnosti je volba standardní linky, která má širokou podporu. V úvahu tedy připadá klasická sériová linka RS-232, USB a Ethernet. První jmenovaná je mnohem jednodušší než zbylé dvě, nicméně právě požadovaná podpora se pomalu vytrácí. USB je velmi rozšířené, nicméně jeho obsluha je již poněkud obtížnější, Ethernet je na tom podobně. Běžné počítače a notebooky jsou navíc většinou vybaveny pouze jedním konektorem pro Ethernet a ten je většinou využit pro připojení k síti a potažmo internetu. Naproti tomu, USB konektorů bývá na osobních počítačích dostatek.

Mikrokontroléry AVR řady Mega nedisponují hardwarem pro USB komunikaci, což nás staví před otázku, jestli zvolit sériovou linku, nebo softwarovou implementaci USB. Vzhledem k určitým obtížím při přístupu k USB zařízení ze strany PC a zátěži, kterou klade programová náhražka USB na MCU, bude vhodnější komunikovat přes klasickou sériovou linku a v případně nutnosti bude možné použít RS-232 ↔ USB konvertor. Mikrokontroléry AVR obsahují USART, přes který lze komunikovat na sériové lince, pracuje ale pouze s úrovněmi TTL. Je tedy nutné použít převodník na napěťové úrovni používané u RS-232, například velmi známý a často používaný obvod MAX232 firmy Maxim. Pokud bychom chtěli připojení přes USB, je možné signál sériového portu dále konvertovat jak je naznačeno na Obr. 20. K tomuto účelu se vyrábějí také specializované integrované obvody, například firma FTDI Chip a její FT232RL apod. Při použití podobného převodníku je vytvořen virtuální sériový port, ke kterému se však přistupuje zcela standardním způsobem, jako by šlo o klasický fyzický port.



Obr. 20: Blokové schéma komunikace přístroje s PC

Nastavení komunikační jednotky USART umožňuje volbu přenosové rychlosti, je tedy třeba určit přibližný tok dat sériovou linkou. Pokud bychom zvolili příliš malou rychlost, data by se nestíhala odesílat a došlo by k přetečení bufferu. Je zřejmé, že naprostá většina dat budou výsledky měření odesílané z mikrokontroléru. V zadání je uvedena podmínka doby skenování méně než dvacet sekund a předpokládejme, že na dráze délky jeden metr změříme maximálně tisíc vzorků. AD převodník má rozlišení deset bitů, ale pro jednoduchost budeme data ukládat do šestnáctibitových proměnných

typu integer. Z těchto úvah vyplývá, že musíme za jednu sekundu přenést minimálně $(1000 \cdot 16) / 20$ bitů, což je 800. Zde je třeba ještě upozornit na kódování přenosu. Odesílání jednoho bajtu netrvá pouze osm hodinových cyklů, jak by se na první pohled mohlo zdát, ale jsou zde i start bit, stop bity a parita. Start bit a jeden stop bit jsou povinné, další položky už ne. Při požití jen nezbytných příznaků tedy dostáváme kódování 8/10, čili pro přenesení osmi užitečných bitů potřebujeme deset hodinových cyklů a minimální rychlost přenosu je tedy 1000 baudů. Je vidět, že obavy z nedostatečné rychlosti byly zbytečné, protože mikrokontrolér AVR dokáže při taktování na 16 MHz komunikovat rychlostí až jeden megabaud za sekundu. Zvolíme některou ze standardních komunikačních rychlostí (viz. [5]), například 19200 Baudů. Tato rychlost MCU zbytečně nevytíží a data budeme odesílat téměř dvacetkrát rychleji.

Standard popisující sériovou linku RS-232 specifikuje, z hlediska ISO/OSI modelu, pouze fyzickou vrstvu. Na jednu stranu to dává programátorovi větší volnost, ale zase je třeba celý zbytek komunikace napsat vlastní. ISO/OSI model definuje celkem sedm vrstev komunikace, od fyzické, přes linkovou a další, až po aplikační, která poskytuje rozhraní pro program běžící na PC. Sériová linka je velmi široce využívána a proto lze nalézt mnoho balíků softwaru, které činí práci velmi jednoduchou, bez potřeby seznámit se se všemi technickými detaily. Použitelné knihovny jsou součástí snad každého lepšího operačního systému a v přizpůsobené podobě s určitými nadstavbami je lze nalézt i u některých velkých knihoven pro tvorbu aplikačního rozhraní, příkladem mohou být Qt4, Winapi a další.

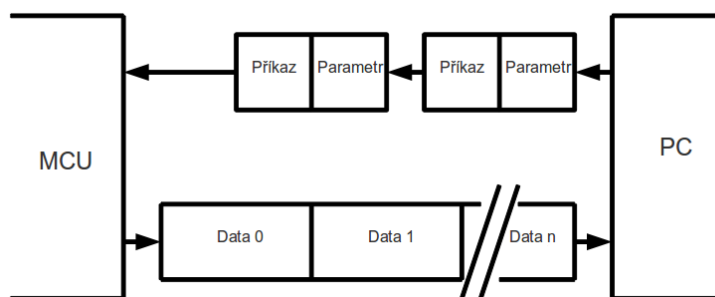
Na straně mikrokontroléru je situace obdobná, i zde lze použít již vytvořené knihovny, poskytující komplexní soubor funkcí pro přenos dat. Mnohem běžnějším způsobem je však naprogramování jen minimální podpory komunikace, která umí třeba jenom přijmout a odeslat jednotlivé bajty. Protože v MCU s malou pamětí je třeba šetřit velikostí kódu, je na tomto základě mnohdy vystavěn jen jednoduchý, jednoúčelový systém pro předávání informací.

Při pohledu na přenášená data je zřejmé, že bude třeba vytvořit právě takový, na míru "ušíty" systém. Ze strany PC budou do měřícího přístroje chodit různorodé, krátké příkazy, například zapnutí skenování laserového paprsku. Některé budou ke svému správnému vykonání potřebovat přenést ještě parametr, příkladem by mohla být změna rozlišení skenování. Více spolu souvisejících dat najednou už asi nebude třeba posílat, z PC do MCU tedy budou chodit jen krátké pakety obsahující příkaz a parametr. Pro obojí by měla dostačovat velikost osm bitů (tedy 256 hodnot, což je dost pro zakódování všech potřebných příkazů a je dostatečné jako rozlišení parametru).

Komunikace ve směru MCU → PC má zcela opačný charakter. Ucelený soubor dat nebudeme přenášet tak často jako ve směru PC → MCU, ale zato bude mít mnohem větší objem. Data budou pouze jednoho druhu (změřená intenzita) a velikost bude předem známá (počet vzorků). Navíc je zřejmé, že data začnou přicházet po odeslání příkazu ke startu skenování a dobu skenování, čili čas, kdy mohou data přicházet, lze

jednoduše vypočítat z rychlosti posuvu senzoru. Vzhledem k těmto faktům není třeba k datům doplňovat žádnou informaci o jejich významu, neboť ten je předem znám. Zde předpokládáme, že v téměř laboratorních podmínkách, kde má být přístroj využíván, nehrozí posun senzoru, který bychom sami nevyvolali. V náročnějších provozech, kde by k něčemu takovému mohlo dojít, by bylo třeba měřit i polohu senzoru a pak by samozřejmě byly spolu spjaty naměřené hodnoty polohy a intenzity.

Z výše uvedeného vyplývají požadavky na programové vybavení MCU a PC, alespoň tedy z hlediska komunikace. Mikrokontrolér musí umět odesílat šestnáctibitové naměřené hodnoty a přijímat pakety typu příkaz-parametr (i když parametr někdy nebude využit). Řídící software na PC naopak musí správně číst příchozí data ve tvaru dvoubajtového čísla (bylo by vhodné implementovat ochranu z hlediska doby skenování, daly by se tak odhalit potíže při přenosu) a odesílat příkazy s parametry.



Obr. 21: Grafické znázornění výměny dat mezi MCU a PC

2.7 Firmware MCU

Vnitřní program mikrokontroléru, neboli firmware, je nezbytnou součástí celého projektu. Právě zde budou implementovány všechny funkce popsané v předešlých kapitolách, tj. řízení motoru, snímání dat ze světelného senzoru a komunikace s PC.

Před začátkem programování je třeba vybrat si programovací jazyk. V našem případě jsou zde dvě hlavní alternativy, a to assembler a jazyk C. Existují i jiné možnosti, ale ty jsou spíše na okraji zájmu a lidé pracující s mikrokontroléry AVR profesionálně programují ve výše uvedených jazycích. Assembler má hlavní výhodu v tom, že programátor drží vše pevně v rukou a proto je výsledkem velmi efektivní kód, který zabírá málo paměti. Nevýhodou je nicméně fakt, že zdrojový kód v assembleru je poměrně nepřehledný a rozsáhlý, takže správa větších projektů se stává neúnosně komplikovanou. Navíc produktivita práce je oproti jazyku C menší, protože pro vytvoření programu vykonávajícího stejnou činnost je třeba napsat mnohem více textu. Jazyk C nabízí větší programátorský komfort a tím pádem kód přibývá výrazně rychleji. Velké projekty lze snadno spravovat a není problém (při správném návrhu) dělat

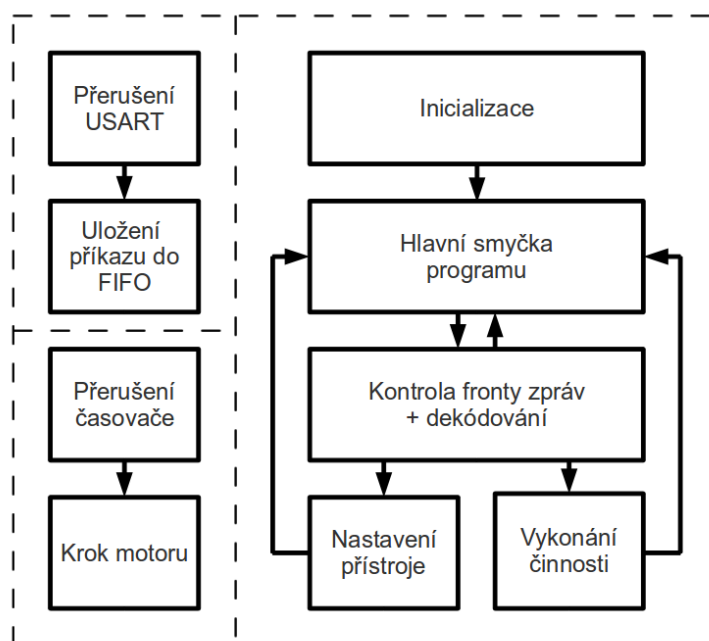
dodatečné úpravy. V praxi se jazyk C používá častěji, ale někdy jsou kritické části kódu psány v assembleru.

Vývojové prostředí, jak bylo uvedeno v kapitole 2.4, je zcela zdarma. Výrobce poskytované AVRstudio pracuje v operačním systému Windows, ale existuje i na platformě nezávislá alternativa avr-gcc, která funguje také v mnoha jiných OS včetně Linuxu. Protože firma Prototypa a.s. preferuje používání svobodného softwaru a primárně nasazuje Ubuntu Linux, bude vývoj probíhat právě s tímto nástrojem.

Samotná architektura programu je poměrně jednoduchá (viz. Obr. 22). Po vstupu do funkce `main()` proběhnou nezbytné inicializace použitých periférií (USART, AD převodník, časovač) a pak program vstoupí do nekonečné smyčky. Zde neustále probíhá kontrola zásobníku sériové linky, jestli se neobjevily nějaké příkazy a pokud ano proběhne jejich dekodování. Nezávisle na této smyčce se zpracovávají přerušení od komunikační jednotky a časovačů.

V zásadě jsou implementovány dva hlavní typy příkazů. Jedna skupina nastavuje přístroj, například počet vzorků, nebo rychlost posuvu. Druhá skupina zahrnuje činnosti. Jedná se o inicializaci – čili najetí vozíku do výchozí polohy a o spuštění skenování. Při vykonávání daného úkolu nejsou další příchozí příkazy okamžitě dekodovány, ale jsou pouze ukládány v zásobníku typu FIFO o hloubce osm zpráv.

Samotné skenování je poměrně jednoduchý proces. Na začátku je z požadovaného počtu vzorků a známé délky dráhy vypočítána velikost úseku, o který se má vozík mezi jednotlivými měřeními posunout. Dál už se pouze v cyklu provádí řetězec funkcí: měření → odeslání dat → posun.



Obr. 22: Blokové schéma programu MCU

Ve firmě Prototypa a.s. jsou mikrokontroléry AVR pro jednoduché úkoly hojně využívány a tak průběhem času vznikla knihovna funkcí v jazyce C. Aby tento projekt vyhovoval firemnímu standardu, budou pokud možno využívány funkce právě z této knihovny.

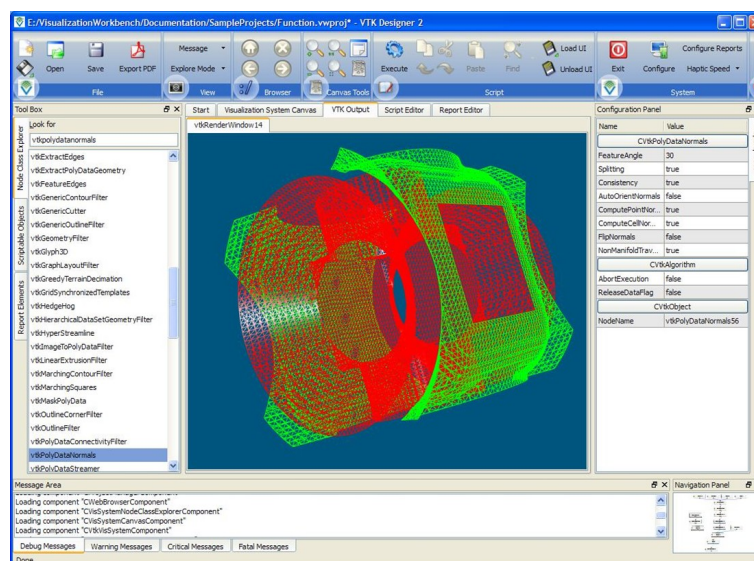
2.8 Software pro PC

Nezbytným úkonem při měření jakékoli veličiny je zpracování a vyhodnocení získaných dat. Pomineme-li jednoduchá orientační měření, kdy například voltmetrem zkoumáme stav nabití baterie, je většinou zpracování výsledků pro jejich množství časově náročné. Tato úloha je jako stvořená pro počítač, kde lze algoritmizovatelné úlohy během velmi krátkého času vyřešit. Při našem měření nasbíráme až stovky hodnot, z nichž má být určena střední hodnota, odchylky mimo rozsah a tak dále. Je zřejmé, že ruční zpracování by bylo velmi pracné a zdoluhavé, takže propojení se softwarem běžícím na PC je nezbytné.

Požadavky firmy Prototypa a.s. ohledně softwaru jsou jednoznačné, nicméně pro úplnost je vhodné uvést, že kromě programovacích jazyků C/C++ existují i jiné, které by stejnou činnost zvládly. Alternativou je třeba Java, Delphi, Visual Basic a další, nicméně C++ je velmi vyspělý, moderní programovací jazyk, který je nasazován i na nejnáročnější aplikace jako třeba CAD software, simulační programy, nebo počítačové hry. Starší jazyk C, který je v podstatě podmnožinou C++, má své pevné místo v praxi už mnoho desítek let a důkazem jeho kvalit může být třeba to, že je v něm napsáno Linuxové jádro.

Stejně jako při volbě jazyka, máme svobodu i při rozhodování, kterou z grafických knihoven pro tvorbu uživatelského rozhraní použijeme. V prostředí Windows je velmi časté použití WinApi a jeho nadstavby MFC, v Linuxu jsou zde například grafické knihovny Gnome a KDE. Společnou nevýhodou těchto tří produktů je, že fungují pouze na své platformě a jinde je lze zprovoznit pouze nepřímo pomocí emulátorů. Tuto nevýhodu odstraňuje právě knihovna Qt4, ve které má být ovládací a vyhodnocovací program podle požadavků napsán. Je stavěná tak, že jednou napsaný kód stačí přeložit pro daný operační systém a vše bez problémů funguje. Toto samozřejmě platí jen pro grafické rozhraní a funkce poskytované Qt4, napíšeme-li do programu ještě jiný kód záviselý na OS, tak ten fungovat nebude. Snadná portovatelnost je v dnešní době velkou devizou, protože minimálně podpora Windows a Linuxu zároveň je dosti žádaná. Druhá obrovská výhoda je, že firma Nokia uvolnila Qt4 pod licencí LGPL⁸, což znamená, že i pro komerční využití je zcela zdarma.

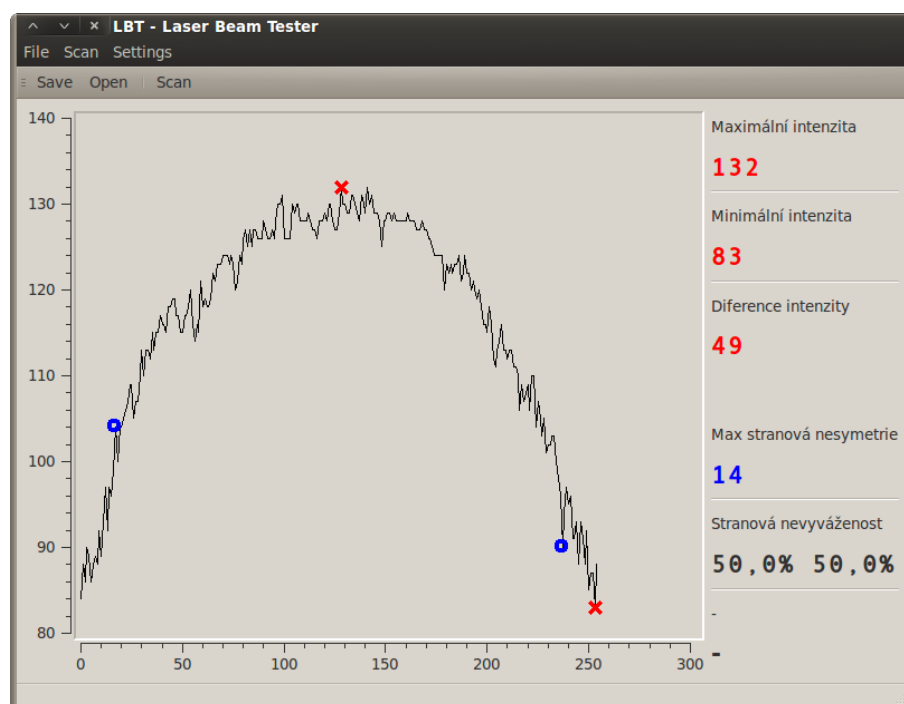
8 Celý text 'Lesser General Public License' je dostupný na adrese <http://www.gnu.org/licenses/lgpl.html>



Obr. 23: Příklad aplikace vytvořené pomocí knihovny Qt4 (převzato z [8])

Základem ovládacího a zobrazovacího programu by měl být graf závislosti intenzity světla na poloze měřící hlavy. Protože nás pro určení nestejnoměrnosti osvitu zajímají jen relativní odchylky, není třeba provádět žádný přepočítání a můžeme bez újmy na vypovídací hodnotě zobrazovat přímo čísla z AD převodníku. Podle požadavků uvedených v kapitole 1.2. budou ještě zobrazeny číselné hodnoty maxima a minima osvitu a stranová nesymetrie. Hlavní okno programu by rovněž mělo obsahovat tlačítka na spouštění měření, ukládání hodnot a otevírání souborů s uloženými hodnotami. Dále je třeba umožnit uživateli nastavení parametrů skenování paprsku. Vzhledem k tomu, že se tato nastavení pravděpodobně změní jen na začátku práce, není třeba, aby zabíraly místo v hlavním okně aplikace a budou přístupné klasicky v menu *Nástroje* → *Možnosti*. Primární volba je počet vzorků, dále rychlost skenování. Ještě bude menu obsahovat nastavení portu, na který je zařízení připojeno.

Samotné řešení této koncepce vychází z nepřeberných možností knihovny Qt4 a Qwt. Výsledek je možno posoudit na Obr. 24. Vzhled grafu stačí použít nejjednodušší možný, významná je ovšem funkce normalizace, která po ukončení měření posune počátek osy *y* tak, aby křivka byla přes celou plochu grafu. Tím je umožněna detailnější kontrola změřených hodnot. Požadované statistiky jsou po pravé straně, pro lepší orientaci a snadné čtení z větší vzdálenosti jsou čísla zvětšena a jsou barevně odlišena. Kritické hodnoty jsou zároveň v grafu značeny symbolem korespondující barvy.



Obr. 24: Hlavní okno programu

3 ZÁVĚR

Vytvořený přípravek odpovídá požadavkům firmy Prototypa a.s., čili je schopen měření intenzity světla laseru s válcovou optikou po celé délce jeho stopy a výsledky jsou zobrazovány na PC. V následujících odstavcích budou probrány různé obecné aspekty, kterým nebylo výše věnováno dostatek prostoru, nebo nebyly diskutovány vůbec. Úplně nakonec provedu zhodnocení celého projektu.

3.1 Bezpečnost

Bezpečnostní pokyny musí být uvedeny u každého elektrického zařízení a ani toto není výjimkou. Přístroj je napájen malým napětím 24 V stejnosměrných, což je pro prostory laboratorní a dílenské zcela bezpečné. Propojení s osobním počítačem by nemělo působit jakékoli potíže, pro maximální zabezpečení je možné použít kabel s galvanickým oddělením signálů. Mechanika obsahuje nekryté pohyblivé části poháněné silným motorem, které by mohly být případným rizikem. Zde se předpokládá, že obsluhující člověk je znalý práce s obdobnými přístroji a neopatrnou manipulací neohrozí sebe ani své okolí. Stroj je možné okamžitě zastavit odpojením od sítě, všechny součásti zůstanou na místě kde byly v okamžiku odpojení a nepokračují v pohybu.

Zcela samostatná kapitola bezpečnosti je laser. Měřené zdroje budou kategorie IIIa do 5 mW o vlnové délce 655 nm, což spadá do viditelného spektra (červená barva). Pohled do zdroje této kategorie je možný, oko ochrání mrkací reflex. Hrozbu ovšem představují optické pomůcky jako brýle nebo dalekohled. Vzhledem k rozkladu paprsku dochází k dalšímu snížení intenzity světla, pokles je přímo úměrný vzdálenosti od zdroje. Práce s přístrojem tedy nevyžaduje speciální ochranu očí, ale je třeba dbát základní opatrnosti, tedy nedívat se očima přímo do laserového zdroje.

3.2 Reprodukovatelnost přístroje

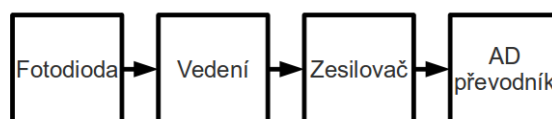
Měřicí zařízení bylo od počátku vyvíjeno jako kusová záležitost pro interní využití firmy Prototypa a.s. bez vyhlídek na opakovanou výrobu, čemuž odpovídá použitý materiál a provedení. Bylo možné ušetřit mnoho prostředků využitím součástí z jiných přístrojů, které by nebyly jinak k užítu, nebo skončily na smetišti. Příkladem může být (upravená) deska řídící elektroniky, která původně sloužila v projektu robotické spouště, nebo lineární vedení pocházející z vyřazeného rentgenu.

Je zřejmé, že toto si u komerčně prodávaného produktu nelze dovolit. Bylo by třeba vhodně upravit desku řízení, aby lépe vyhovovala kladeným požadavkům a použít originální díly, což vede výraznému prodražení celé konstrukce. Samozřejmostí jsou certifikáty ohledně bezpečnosti a přesnosti, které každý zákazník vyžaduje.

3.3 Přesnost měření a zdroje chyb

Přístroj slouží pro měření intenzity světla v závislosti na poloze (v jednom rozměru). Je tedy třeba odděleně posoudit zdroje chyb, potažmo přesnost nastavení konkrétní pozice a snímání měřené veličiny.

Posouvání vozíku je realizováno krokovým motorem a ozubeným řemenem. Pohon sám je z principu přesný a i když kroky nemusí být dokonale totožné, můžeme říci, že po vykonání jedné otáčky je hřídel zcela přesně ve výchozí pozici (součet velikostí všech kroků na jednu otáčku je přesně 360°). Tato teoretická úvaha je podmíněna přesným řízením, ale v praxi se na ni lze spolehnout. Můžeme tedy říci, že motor závažnou nepřesnost nevyvolá. Toto už ale neplatí o řemenu, který je pružný a vozíku, který se nepohybuje zcela bez odporu. Při velmi malém natočení se řemen lehce napne, avšak tato síla nestačí k překonání statického tření vozíku a nedojde k pohybu. Uplatňuje se zde tedy vůle v převodech a samozřejmě dynamika charakterizovaná primárně pružností řemene a třením (tedy tlumením) vozíku. Vzhledem k faktu, že nejmenší posun je cca 5 mm (jedná se o velikost aktivní plochy fotodiody, není třeba vzorkovat jemněji, aby se vzorky překrývaly), můžeme vliv natočení hřídele zcela zanedbat a i chyba způsobená převodem bude řádově menší než námi zvolený interval. Nastavení polohy lze tedy považovat za dostatečně přesné.



Obr. 25: Blokové schéma měření intenzity světla fotodiodou

Na Obr. 25 je naznačena cesta, po níž informace o okolním osvětlení vstupuje do řídicího mikrokontroléru. Zobrazeny jsou pouze nejvýznamnější součásti, kde také mohou vznikat největší chyby. Fotodioda jako každý polovodičový prvek má vlastní šum, zde však nebude příliš významný, neboť měřené intenzity jsou vysoko nad jeho úrovní. Druhým možným zdrojem potíží je směrová charakteristika diody. Laserový paprsek nedopadá v celé délce kolmo na snímač a je tedy na místě obava, že by mohlo dojít ke zkreslení výsledků. Z těchto důvodů je použit typ fotodiody s dostatečně širokou charakteristikou, který ve firmě Prototypa a.s. na stavbu snímačů běžně používají a jsou s ním dlouhodobě dobré zkušenosti. Fotodioda je se zesilovačem propojena stíněným diferenciálním vedením, které kvalitně potlačuje možné rušení. Chyba ke které zde může dojít je primárně závislá na prostředí a okolních vlivech. Nelze ji tedy snadno kvantifikovat avšak při provozu přístroje v podmínkách pro něj je konstruován by nemělo docházet potížím. Vstupní analogový obvod sestavený z operačních zesilovačů (OZ) může být zdrojem jak soustavné chyby tak nahodilého

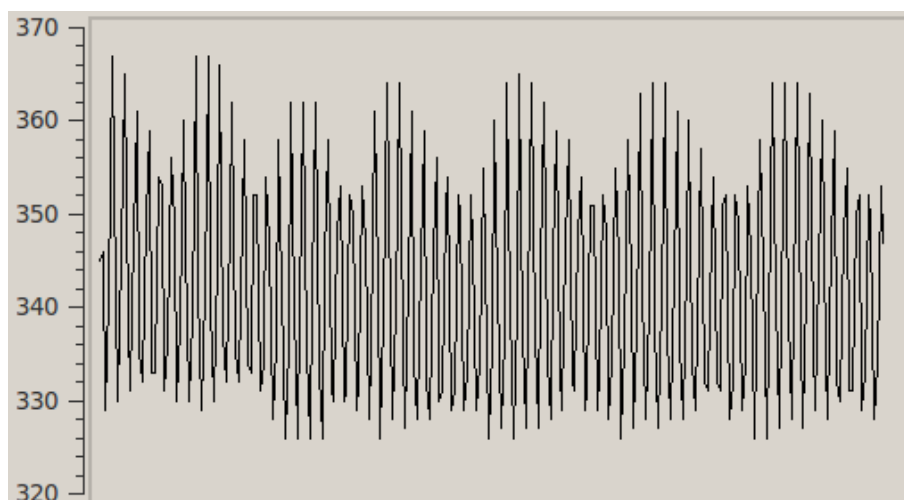
šumu. Velkou roli hraje výběr kvalitního OZ, kterým je možné velkou část nepřesností potlačit. Použitý AD8628 jistě spadá do této kategorie. Ještě je nutné upozornit na kvalitu rezistorů, jimiž je nastaven zisk zesilovače. Diferenciální zapojení je citlivé na nesymetrické hodnoty odporů, proto je třeba vybrat co možná nejpodobnější kusy. Posledním místem kde mohou vznikat problémy je AD převodník. Výrobce v katalogovém listu uvádí absolutní přesnost ± 2 LSB (least significant bit = nejméně významný bit). Při rozlišení deset bitů se dostáváme na odchylku přibližně 0,2 % z rozsahu. Tato chyba je soustavná a lze ji korigovat – dle datasheetu – až na $\pm 0,5$ LSB, což je však velmi optimistická hodnota.

Celkovou chybu lze rozdělit v zásadě na tři složky – aditivní, multiplikativní a šum. Aditivní část nám vcelku nevádí, protože naší snahou není zjistit přesnou intenzitu světla, ale jen porovnávat její velikost vůči střední hodnotě. Pokud tedy budou všechny vzorky posunuty o stejný interval, naší analýze to na přesnosti neubere. Multiplikativní chyba je závažnější a mohla by působit problémy, nicméně její hlavní zdroj – diferenciální zesilovač byl sestaven z pečlivě vybraných součástek, takže její velikost by neměla být příliš markantní. Šum se podařilo z velké části potlačit, při zkušebním měření se zakrytým senzorem byly odchylky maximálně ± 2 LSB. Vzhledem ke konstrukci zesilovače je rozsah AD převodníku pouze poloviční – čili 512 hodnot. Amplituda šumu tedy má velikost přibližně 0,4 % z rozsahu a celková chyba se zřejmě pohybuje pod hranicí 1 %.

Z vnějších vlivů ovlivňujících měření bylo zatím zmíněno jen elektromagnetické pole. Brát v potaz je třeba i teplotu, vlhkost a tlak, nicméně předpokládáme, že při provozu přístroje v podmínkách, pro které je určen, budou tyto veličiny v rozumných mezích. Nezbytné je ovšem upozornit na vliv světelných podmínek na pracovišti. Fotodioda je dosti citlivá a měřený laser nepřítis výkonný, může se tedy stát, že okolní světelné podmínky se výrazně podepíší na výsledku měření.

Při práci za přirozeného osvětlení je nutné přístroj umístit rovnoběžně s oknem, aby všechny body dráhy snímače byly od něho stejně vzdáleny. Při pohledu pouhým okem se změna světelných podmínek při kolmém umístění nejeví nijak výrazně, ale pro měřicí účely jde o zásadní rozdíl, který může mít devastující vliv na výsledek měření. Podobné potíže mohou nastat i při nevhodném umístění zdrojů umělého osvětlení. Před zahájením práce je tudíž vhodné provést jedno měření "naprázdno" s vypnutým laserem a ujistit se tak o stavu světelných podmínek.

K umělým zdrojům osvětlení se váže ještě jeden problém, a to nestejnoměrná svítivost v čase. Zde jsou ideální klasické žárovky, světlo zářivek pulzuje a opět vnáší chybu do našeho měření.

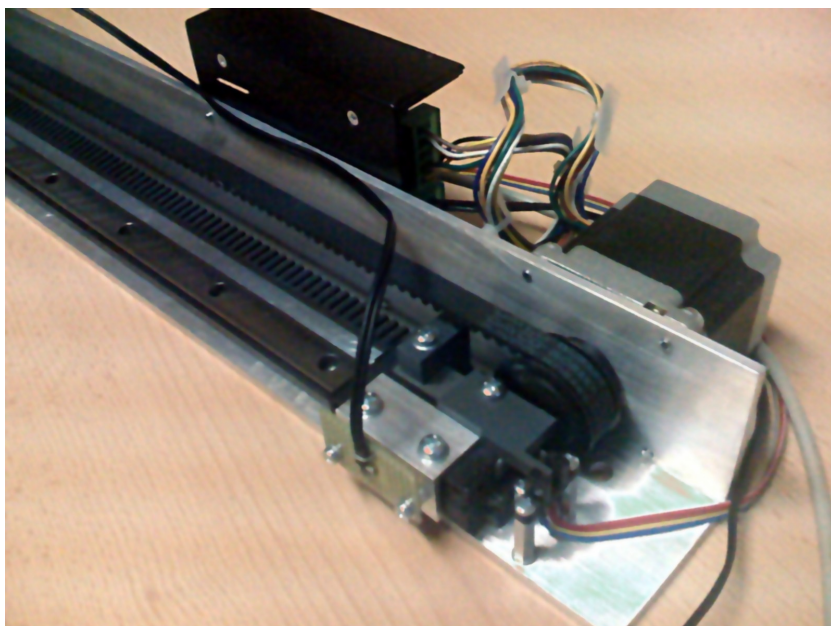


Obr. 26: Vliv pulzující svítivosti žárovky na měření

3.4 Fotografie přístroje



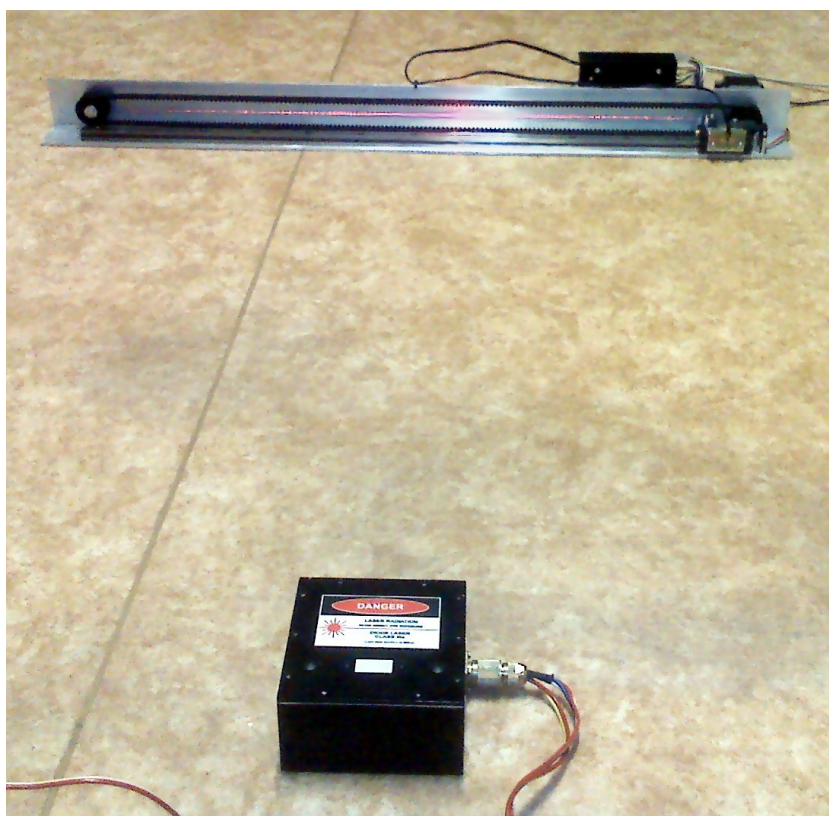
Obr. 27: Pohled na celý přístroj



Obr. 28: Detail vozíku s fotodiodou, z druhé strany L profilu je
krokový motor a řídicí elektronika



Obr. 29: Deska řídicí elektroniky



Obr. 30: Měření laserového zdroje

3.5 Možnosti vylepšení přístroje

Možnosti vylepšení byly více či méně zmíněny v kapitolách týkajících se jednotlivých částí projektu. Přesto bych je rád všechny shrnul zde, neboť se jedná o významnou součást hodnocení celé práce.

Mechanická konstrukce je skutečně minimalistická, alespoň hnané kolo řemenového převodu by bylo vhodné umístit na osu uloženou v ložiscích, ale i motoru by prospělo, kdyby jeho hřídel nemusela držet sílu od pružícího řemene. Napínání převodu by si zasloužilo robustnější a snáze nastavitelný mechanismus. Zkvalitnění mechanické konstrukce znamená hladší chod a tedy možnost osadit slabší (tím pádem i lacinější) motor.

Řídící elektronika je naprosto dostatečná a není důvod na její koncepci cokoli měnit. Analogovou vstupní část by bylo dobré přebudovat, aby se rozsah napětí posunul z $-2,5 - 2,5$ V na $0 - 5$ V. S daným plošným spojem je podobná úprava problematická, tak jsem k ní nepřistoupil, pokud by však bylo možné vyrobit desku novou, je jistě na místě tuto změnu udělat. V současné době je přístroj určen pro provoz v podmínkách elektrotechnické dílny. Kdyby měl být nasazen do prostředí s velkým rušením, je třeba provést úpravy podle posledního odstavce kapitoly 2.5.

Komunikační protokol je nyní sestaven tak, aby byl maximálně efektivní se současnými povely řízení. Problém nastane v okamžiku, kdy bychom chtěli dotvořit například diagnostické funkce, kdy by přístroj odpovídal na dotazy ohledně svého nastavení, eventuálně průběhu skenování a podobně. Současný stav je takový, že data odesílaná z přístroje mohou mít pouze jeden význam (intenzita světla), jeden formát (16ti bitová proměnná) a podle pořadí, v jakém přicházejí, je lze jednoznačně zařadit. Pro rozeznání různých dat by bylo třeba zařadit například hlavičkový bajt, který by nesl informaci o významu dalších, za ním následujících. Toto opatření rozšiřuje možnosti komunikace, ale přibývá nezbytná režie, což klade větší nároky na přenosovou rychlost.

Firmware MCU považuji za dostatečný, pouze pokud by došlo k rozšiřování komunikačního protokolu podle předchozího odstavce, bude nutné zde implementovat potřebné změny.

Software pro PC momentálně splňuje pouze základní požadavky, které umožňují jednoduchou interpretaci naměřených dat. Program by bylo možné rozšířit i o další statistické funkce, které by mohly uživateli pomoci s analýzou. Samotné grafické zobrazení je také možné vylepšit, například nastavitelná "maska" vymezující oblast tolerance by výrazně urychlila orientaci v grafu. Rozšířit by se daly i možnosti úpravy signálu, primárně digitální filtrace šumu. S novými funkcemi souvisí i nové možnosti nastavení, protože všechny nástroje by mělo být možné upravit podle aktuálních potřeb.

3.6 Zhodnocení

Přístroj pro měření vlastností laserového zdroje s válcovou optikou je nyní připraven k použití a splňuje podmínky zadavatele, tedy firmy Prototypa a.s. Jak už to bývá, požadované vlastnosti se během vývoje mírně upravovaly, primárně se jedná o délku aktivní oblasti měření. Ukázalo se, že pro připevnění na zkušební rám by celková délka zařízení neměla přesáhnout 85 cm a měřicí rozsah stačí 70 cm, takže byl přístroj poněkud zmenšen. Na základě výše uvedených úvah a principů by však rozhodně šlo sestavit i větší model. Lze tedy říci, že zadání bylo bezezbytku dodrženo.

Při stavbě zařízení jsem použil prvky dodané firmou Prototypa a.s., které již neměly uplatnění v jiných projektech, čímž se podařilo ušetřit nemalé finanční prostředky. Softwarovou část už z ničeho takto "recyklovat" nešlo, naprogramoval jsem ji od nuly pomocí standardních knihoven vhodných pro dané účely. Zde byl opět kladen důraz na finance, tedy licenci použitých nástrojů. Vývoj byl prováděn v operačním systému Ubuntu (Linux), který je zcela svobodně šiřitelný, za použití Qt4 knihovny pro tvorbu PC programu (licence LGPL) a AVR-gcc pro program mikrokontroléru (GNU). Vzhledem k tomu, že vše je volně použitelné i pro komerční účely, ani při tvorbě softwaru nebylo nutné vynakládat zbytečné peníze.

Uživatelský komfort zajišťuje přehledné a intuitivně ovladatelné prostředí řídicího programu pro PC. Nejčastěji používané funkce jsou dostupné přímo z hlavního okna a

příslušné statistiky včetně barevného značení významných hodnot usnadňují analýzu naměřených dat. Samotné měření je poměrně rychlé, trvá cca 3,5 sekundy, což je hluboko pod požadovaným limitem 20ti sekund.

Přístroj je možné používat v běžných pokojových podmínkách a při dodržení zásad ohledně okolního osvětlení popsaných výše, by celková chyba měření intenzity světla neměla překročit 1 % z rozsahu. Lineární posuv zaručuje velmi dobrou přesnost nastavení polohy i při opakovaných měřeních.

Měřicí zařízení samozřejmě není dokonalé a bylo by možné ho v mnoha ohledech vylepšit. Toto se týká především mechaniky (robustnost) a softwaru pro PC (více funkcí usnadňujících analýzu). Detailně jsou tyto věci popsány v předchozí kapitole.

Závěrem lze tedy konstatovat, že měřicí přístroj pro zjišťování vlastností laseru s válcovou optikou funguje a v praxi slouží dle požadavků, byť by samozřejmě bylo možné jeho vlastnosti dále zlepšovat.

4 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] NOVÁK, P. *Mobilní roboty - pohony, senzory, řízení*. 1. Praha : BEN, 2005. 256 s. ISBN 80-7300-141-1.
- [2] PUNČOCHÁŘ, J. *Operační zesilovače v elektrotechnice*. 5. Praha : BEN, 2002. 496 s. ISBN 80-7300-059-8.
- [3] KOENIG, A; MOO, B. E. *Rozumíme C++*. 1. Praha : Computer Press, 2003. 388 s. ISBN 80-7226-656-X.
- [4] FUKÁTKO, T. *Detekce a měření různých druhů záření*. 1. Praha : BEN, 2007. 192 s. ISBN 80-7300-193-3.
- [5] *ATmega168 datasheet* [online]. [s.l.] : ATMEL, 2010 [cit. 2010-11-29]. Dostupné z WWW: <www.atmel.com>.
- [6] QUIS, P. *CNC shop* [online]. 2010 [cit. 2010-11-29]. Produkty. Dostupné z WWW: <<http://www.cncshop.cz/>>.
- [7] KOTOUČEK, F. *CNC fórum* [online]. 2010 [cit. 2010-11-29]. šrouby a převodovky. Dostupné z WWW: <<http://www.c-n-c.cz/>>.
- [8] Nokia. *Qt4 dokumentace* [online]. 2011 [cit. 2011-05-24]. Dostupné z WWW: <<http://qt.nokia.com/>>.
- [9] *Allegro MicroSystems Inc.* [online]. [s.l.] : ALLEGRO, 2010 [cit. 2011-5-17]. Dostupné z WWW: <www.allegromic.com>

Zdroje ilustračních obrázků:

- [10] MAFRA a.s. *Technet.cz* [online]. 2011 [cit. 2011-05-24]. Dostupné z WWW: <<http://technet.idnes.cz/>>.
- [11] Prototypa a.s. *Prototypa* [online]. 2011 [cit. 2011-05-24]. Dostupné z WWW: <<http://www.prototypa.cz>>.
- [12] Optimas Manufacturing Solutions. *Company website* [online]. 2009 [cit. 2011-05-24]. Dostupné z WWW: <<http://www.optimasms.com>>.
- [13] DLOUHÝ, M.; WINKLER, Z. *Robotika.cz* [online]. 2011 [cit. 2011-05-24]. Dostupné z WWW: <<http://robotika.cz/>>.
- [14] Panasonic. *Panasonic Electric Works Corporation of America* [online]. 2011 [cit. 2011-05-24]. Dostupné z WWW: <<http://pewa.panasonic.com/>>.
- [15] *Wikipedie* [online]. 2011 [cit. 2011-05-24]. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org>>.