



ZÁPADOČESKÁ
UNIVERZITA
V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Měření rychlosti světla přímou metodou

Autor práce: Jan Jeníček

Vedoucí práce: Ing. Petr Sunek

Plzeň 2012

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan JENÍČEK**

Osobní číslo: **E08B0148P**

Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**

Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**

Název tématu: **Měření rychlosti světla přímou metodou**

Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Zpracujte teoretický přehled možností měření rychlosti světla.
2. Navrhněte vhodné řešení elektronické podpory přímého měření rychlosti světla.
3. Zařízení sestrojte.
4. Porovnejte naměřené výsledky s teoretickými předpoklady.

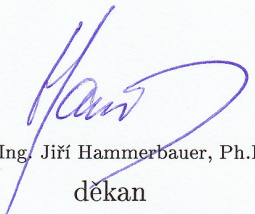


Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

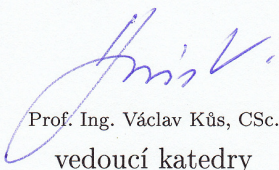
Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Sunek**
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Datum zadání bakalářské práce: **17. října 2011**
Termín odevzdání bakalářské práce: **3. června 2012**


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Abstrakt

Tato bakalářská práce se věnuje návrhu a konstrukci přípravku pro měření rychlosti světla přímou metodou. Měření je založeno na Fizeauově metodě měření pomocí ozubeného kola, která je upravena. Mechanické části jsou provedeny pomocí elektronických obvodů. Samotné vyhodnocení je prováděno pomocí mikroprocesoru. V úvodní části této práce je stručně shrnuta historie měření světla, v druhé části je popsán postup návrhu a provedení měřícího přípravku.

Klíčová slova

Rychlost světla, laserová dioda, fotodioda, disperze světla, fázový posun, mikroprocesor.

Abstract

Jeníček, Jan. *Direct Measurement of the Speed of Light [Měření rychlosti světla přímou metodou]*. Pilsen, 2012. Bachelor thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Electromechanics and Power Electronics. Supervisor: Petr Sunek

This Bachelor's Thesis deals with projecting and development of device for direct measuring the speed of light. The measurement is based on Fizeau method of a rotating cogwheel. This measurement is modified. The mechanical parts have been performed by using electronic circuits. The evaluation is processed by microcontroller. The first part of Thesis is focused on brief overview of the history of measuring the speed of light. The second part is about my design and construction of the equipment for measuring the speed of light.

Keywords

The speed of light, laser diode, photodiode, light dispersion, phase shift, microprocessor.

Prohlášení

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

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci 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 závěrečné 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 § 270 trestního zákona č. 40/2009 Sb.

Také prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 29. května 2012

Jan Jeníček

.....

Podpis

Obsah

Seznam obrázků	vi
1 Úvod	1
2 Stručný přehled historie měření rychlosti světla	2
2.1 První pokusy o měření rychlosti světla	2
2.2 Metoda měření podle Hippolyte Fizeau	3
2.2.1 Matematický základ metody	3
2.3 Další pokusy v 19. století	4
2.4 Závod o zpřesnění výsledku a jeho ukončení ve 20. století	5
3 Současný způsob měření a návrh nového přípravku	6
3.1 Současná úloha měření	6
3.2 Návrh měřicího přípravku	7
4 Optika	9
4.1 Zdroj záření	9
4.2 Schéma odrazu	9
4.3 Ostření světla laserové diody	10
5 Obvod úpravy signálu	12
5.1 Komparátor	12
5.2 Filtr	13
6 Číslicové zpracování a zobrazení	14
6.1 Výběr zobrazovače	14
6.2 Generátor napájecího signálu pro diodu	15
6.3 Programování mikroprocesoru	15
7 Oživení a kalibrace měřicího přípravku	16
7.1 Oživení desky plošného spoje	16
7.2 Kalibrace měřicího přípravku	17
7.2.1 Kalibrace generátoru	17
7.2.2 Kalibrace bloku úpravy signálu	17

8 Závěr	18
Reference, použitá literatura	19
Přílohy	20
A Zadání původní měřicí úlohy	20
B Program mikroprocesoru	24
C Mikroprocesor DPS, schema	27

Seznam obrázků

2.1	Roemerova metoda měření zákrytu měsíce Io. [Převzato z [4]]	2
2.2	Schématické znázornění Fizeauovi metody. A – zdroj světla; B – pozorovatel.	3
2.3	Znázornění intenzity světla v čase.	4
2.4	Foucaulta metoda rotujícího zrcadla. [Převzato z [4]]	5
3.1	Blokové znázornění navrhovaného přípravku. MCU – mikroprocesor; GEN – generátor napájecího signálu laserové diody; LD/PD – laserová dioda a fotodioda; KOMP – komparátor; F – dolní propust; D – dělič napětí. . . .	7
4.1	Znázornění možných uspořádání odrazu. Vlevo – použití se dvěma zrcadly; vpravo – s jedním disperzním zrcadlem a jedním klasickým. LD – laserová dioda (zdroj záření); PD – fotodioda (detektor záření)	10
4.2	Optika CD-ROM mechaniky s umístěnou ostřicí čočkou.	10
5.1	Schéma komparátoru.	12
C.1	Deska plošného spoje. Vlevo pohled z hora.	27
C.2	Schema zapojení mikroprocesoru	28

1

Úvod

Cílem této bakalářské práce je navrhnout řešení přípravku pro měření rychlosti světla přímou metodou pro Fakultu pedagogickou. Přípravek by měl být kompaktní a jednoduchý pro obsluhu. Jeho součástí by měl být řídicí mikroprocesor, který by měl spravovat ovládání, zobrazení naměřených hodnot a v případě potřeby numerické metody zpřesnění výsledků.

V úvodní kapitole stručně popíšu historii měření rychlosti světla od svých počátků. A to hlavně z důvodu získání přehledu o možnostech měření této veličiny.

V další části se budu věnovat současnému způsobu měření této úlohy na Fakultě pedagogické. Současně popíšu základní princip mého návrhu a jeho výhody.

Následné kapitoly se budou věnovat samotnému návrhu přípravku a všech jeho součástí. Konkrétně optické části přípravku. Části zpracovávající a upravující hodnoty měřené na optické části. A také číslicové části obsahující mikroprocesor, LCD displej a generátor referenční frekvence pro měření.

Závěrem popíšu výsledek bakalářské práce.

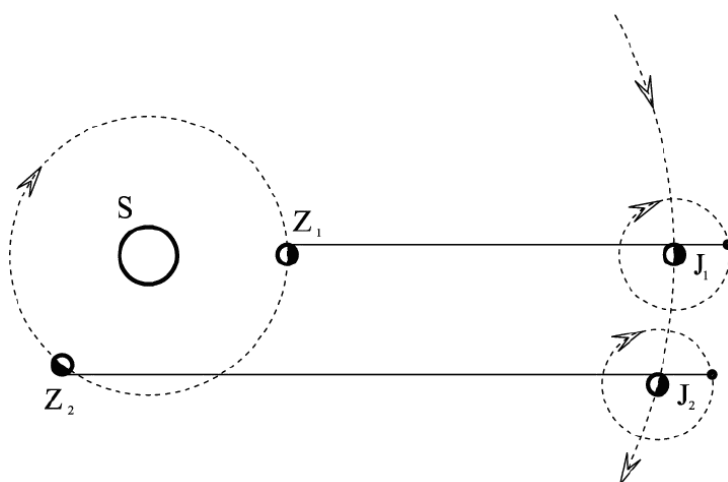
2

Stručný přehled historie měření rychlosti světla

2.1 První pokusy o měření rychlosti světla

Snaha o určení rychlosti světla sahá k počátkům 17. století, kdy se jako první pokusil změřit rychlost světla Galileo Galilei. Jeho pokus byl založen na reakci člověka, kdy se se svým asistentem každý postavili na vrchol jednoho kopce míli vzdáleného. První z nich měl odkrýt lucernu, ve chvíli kdy druhý zpozoruje světlo měl udělat totéž. Rychlost světla chtěl spočítat na základě časové prodlevy mezi odkrytím první lucerny a zpozorováním světla s druhého kopce. Je jasné, že vzhledem k rychlosti šíření světla a reakční době člověka byl jeho výsledek zcela mimo reálné hodnoty.

První kdo skutečně změřil rychlost světla byl astronom Ole Roemer, který v roce 1675 své měření založil na pozorování měsíce Jupitera Io. Zjistil, že čas kdy dochází k zákrytu měsíce se mění v závislosti na vzdálenosti Země od Jupiteru. To je způsobeno delší drahou světla, tudíž daný jev pozorujeme později jeli Země více vzdálena. Výsledkem jeho výpočtů bylo $225\,000\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$.



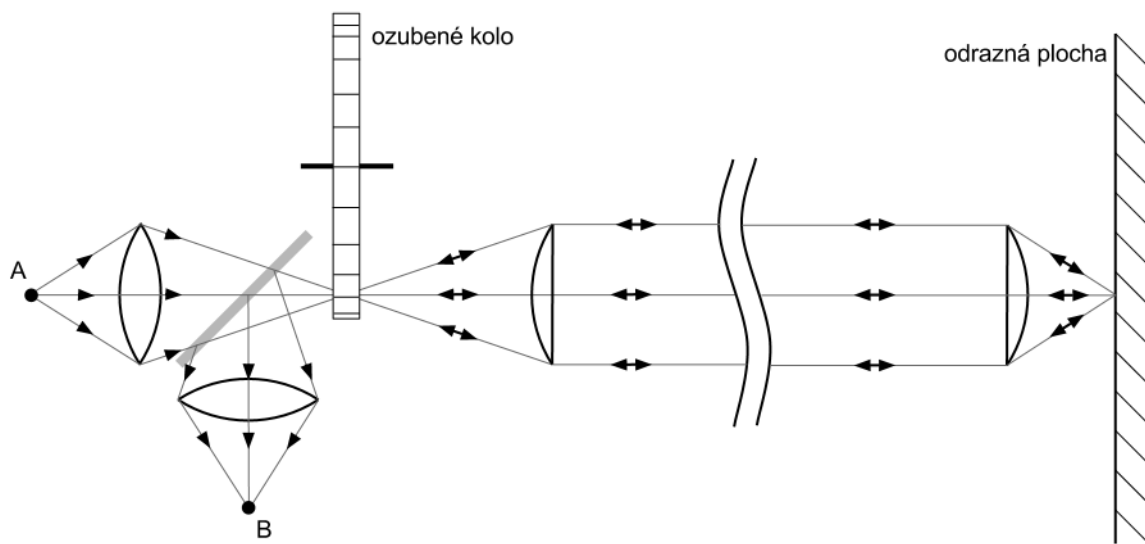
Obr. 2.1: Roemerova metoda měření zákrytu měsíce Io. [Převzato z [4]]

O ukončení debat o konečnosti rychlosti světla se postaral James Bradley v roce 1728, kdy dokázal konečnost světla na základě jevu aberace světla hvězd. Tento jev spočívá ve změně úhlu ve kterém danou hvězdu pozorujeme nad obzorem v závislosti na směru a rychlosti země. Při dopadu světla z hvězd na povrch země dochází ke sčítání rychlosti paprsku světla a rychlosti pohybu planety. Hodnota, kterou takto zjistil je $301\,000\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$.

2.2 Metoda měření podle Hippolyte Fizeau

Tato metoda mi byla inspirací pro návrh mého přípravku, proto tuto metodu popíšu podrobněji.

V roce 1849 navrhl francouzský vědec Hippolyte Fizeau pokus založený na principu rotace ozubeného kola, které střídavě přerušuje a propouští paprsek světla. Paprsek je odražen na 8 km vzdáleném zrcadle zpět k ozubenému kolu. Pozorovatel sleduje paprsek vracející se kolem a upravuje rychlost otáčení tak, aby došlo k úplnému zákrytu.



Obr. 2.2: Schématické znázornění Fizeauovi metody. A – zdroj světla; B – pozorovatel.

2.2.1 Matematický základ metody

Výpočet rychlosti světla je odvozen od následujících rovnic:

$$\tau = \frac{T}{2N} \quad (2.1)$$

$$\tau = \frac{1}{2Nf} \quad (2.2)$$

Kde t je doba záblesku světla, N je počet zubů a mezer ozubeného kola. T a f jsou perioda a frekvence otáčení kola.

$$\tau = \Delta t \quad (2.3)$$

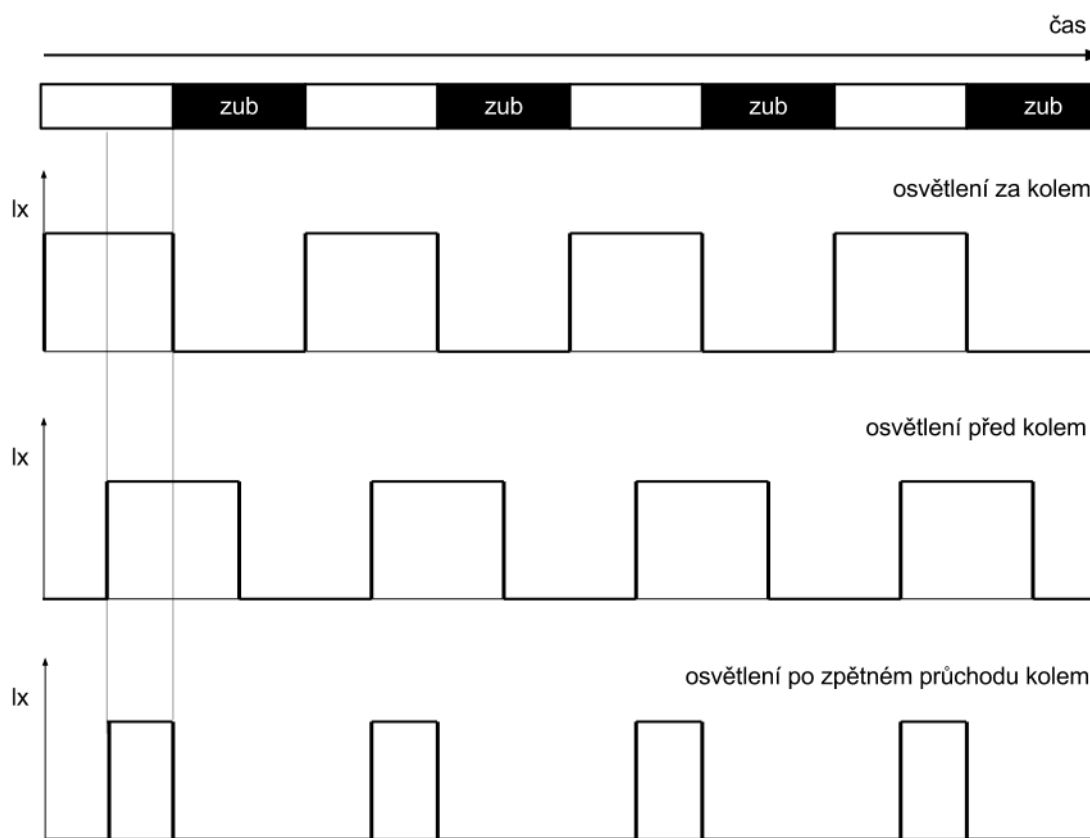
Z principu metody vyplývá, že hledáme takovou periodu otáčení T aby čas Δt , který paprsek potřebuje k překonání stanovené dráhy byl stejný.

$$\Delta t = \frac{2D}{c} \quad (2.4)$$

Takto určíme čas, který světlo potřebuje k překonání své dráhy. D je vzdálenost mezi ozubeným kolem a zrcadlem, c je rychlost světla.

$$c = 4DNf \quad (2.5)$$

Výsledná rovnice pro určení rychlosti světla.

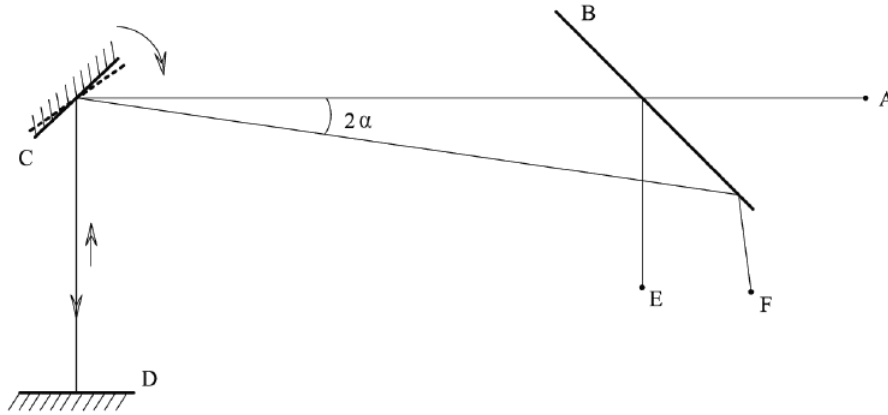


Obr. 2.3: Znázornění intenzity světla v čase.

2.3 Další pokusy v 19. století

Pokusy pokračovaly i v druhé polovině 19. století. Roku 1850 francouzský vědec Jean Foucault navrhl experiment s rotujícím zrcadlem. Jeho návrh byl takový, že zdroj světla vyšle paprsek, který se přes rotující zrcadlo odrazí k zrcadlu pevnému. Odsud se odrazí nazpět

k rotujícímu zrcadlu a zpátky ke zdroji světla. Protože za dobu, kterou paprsek putuje mezi zrcadly, dojde k pootočení rotujícího zrcadla. Paprsek se vrací o malý úhel mimo zdroj světla. Z tohoto úhlu vypočetl rychlost šíření světla $298\,000\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$. Jeho metodu v roce 1879 dále zpřesnil Albert A. Michelson, který dospěl k výsledku $299\,909\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$.



Obr. 2.4: Foucaultova metoda rotujícího zrcadla. [Převzato z [4]]

Za zmínění dále stojí pokus Heinricha Hertze z roku 1888, který jako první měřil rychlost radiových vln. Tedy elektromagnetického spektra mimo obor viditelného světla. Dospěl k výsledku $300\,000\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$.

2.4 Závod o zpřesnění výsledku a jeho ukončení ve 20. století

Ve 20. století dále pokračovaly pokusy o zpřesnění výsledku. V roce 1926 americký vědec Albert A. Michelson zopakoval pokus s rotujícím zrcadlem. Došel ke zpřesněnému výsledku $299\,798\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$. S rozvojem laserové techniky začali být lasery využívány jako zdroje záření, to vedlo k dalšímu zpřesnění měření. Zajímavý návrat ke Galileově metodě umožnil vesmírný projekt Apollo. Na povrch měsíce byla umístěna odrazná plocha, od které byl odražen laserový paprsek. Díky vzdálenosti měsíce bylo možné měřit přímo zpoždění. Celé 20. století probíhalo mnoho pokusů o zpřesnění výsledků měření až do roku 1983, kdy na 17. všeobecném kongresu o mírách a vahách byla rychlost světla s konečnou platností definována na hodnotu $299\,792\,458\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Současně byla vzdálenost jednoho metru definována jako vzdálenost, kterou světlo ve vakuu urazí za $1/299\,792\,458\text{ s}$. Tím byly veškeré nepřesnosti měření přeneseny do definice metru nikoli rychlosti světla.

3

Současný způsob měření a návrh nového přípravku

Jak již bylo v této práci zmíněno, jejím cílem je navrhnout přípravek, který by nahradil současnou metodu měření. Proto tuto metodu podrobněji popíšu.

3.1 Současná úloha měření

Současná úloha je dle zadání odvozena od Fizeauovy metody (kap. 2.2), nicméně z principu popsaného v zadání uvedeného v příloze A je více podobná maření podle Galilea (kap. 2.1). Úloha je založena na vyslání velmi krátkého světelného záblesku, který se odráží od zrcadla vzdáleného přibližně 15m. Světelný záblesk je zaostřen do rovnoběžného svazku tak, aby nedocházelo ke zbytečnému rozptylu. Zařízení obsahuje disperzní zrcadlo, které tento paprsek z části směřuje proti zrcadlu a z části propouští k fotodiodě. Po odrazu se paprsek vrací zpět do přístroje, kde opět prochází disperzním zrcadlem, které ho odráží k fotodiodě.

Z důvodu potřeby, co možná nejkratších světelných pulzů, je použita vysoce svítivá LED dioda. S takovouto diodou je možné dosahovat pulzů o délce 20ns. Protože doba, kterou světlo potřebuje k překonání vzdálenosti $2 \times 15m$, je přibližně 100ns, je na fotodiodě možné naměřit dvě samostatné špičky. Proto aby bylo možné tento jev nějakým způsobem zaznamenat, dochází k opakovanému vysílání pulzů. Průběh je zobrazován na osciloskopu.

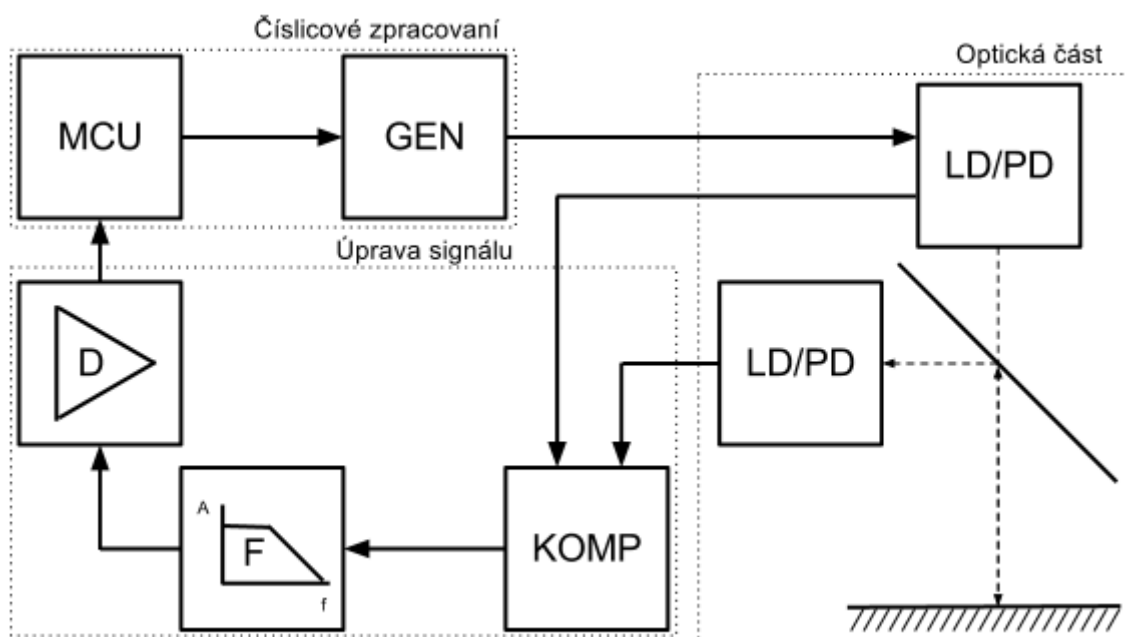
Pro zpřesnění odečítání na obrazovce osciloskopu je na druhý kanál přiváděn referenční signál o frekvenci 10MHz.

3.2 Návrh měřícího přípravku

Při návrhu jsem zvažoval několik metod měření rychlosti světla. Po delší úvaze zvítězil princip odvozený od Fizeauovy metody s ozubeným kolem (kap. 2.2). Protože by bylo velmi obtížné vytvořit mechanické přerušování světla s dostatečnou frekvencí pro měření v laboratorních podmínkách. Zvolil jsem na místo ozubeného kola elektronické přerušování, provedené pomocí generátoru napájecího signálu pro zdroj světla. Protože má ozubené kolo v původní metodě funkci jak přerušovače, tak i stínítka vracejícího se signálu, bylo nutné dále navrhnout komparátor, který by tuto funkci zastoupil.

Jednou z hlavních výhod použití této metody je zajímavý průběh světelného záblesku po průchodu kola (viz. obr. 2.3), který velice připomíná pulzně šířkovou modulaci. Tohoto efektu jsem se rozhodl využít. Díky tomu je možné měřit rychlost světla na libovolné vzdálenosti menší než $\frac{1}{2}$ dráhy, kterou světlo urazí za dobu jedné periody napájecího signálu.

Pro zvýšení přesnosti výsledků, bude měření probíhat ve dvou fázích. Nejdříve dojde ke změření času zpoždění na krátkou vzdálenost (v řádu několika cm), poté bude změřena hodnota zpoždění na delší vzdálenost (v řádu několika m). Výsledná rychlost světla bude počítána jako rozdíl měřených vzdáleností dělený rozdílem časových zpoždění. Tímto postupem dojde k odstranění vlivu zpoždění vzniklého na vyhodnocovací elektronice.



Obr. 3.1: Blokové znázornění navrhovaného přípravku. MCU – mikroprocesor; GEN – generátor napájecího signálu laserové diody; LD/PD – laserová dioda a fotodioda; KOMP – komparátor; F – dolní propust; D – dělič napětí.

Pro zjednodušení návrhu a orientace v práci jsem si celou úlohu rozdělil do tří hlavních částí. V první části (kap. 4) řeším mechanickou konstrukci optiky měřícího přípravku. Ve druhé části (kap. 5) řeším návrh komparátoru a přizpůsobení výstupních signálů optické části pro část číslicovou, která je řešena ve třetí části (kap. 6). Celé blokové schéma navrhovaného přípravku je znázorněno v obrázku 3.1.

4

Optika

Při návrhu optické části jsem řešil výběr vhodného zdroje záření, jeho zaostření a také metodu odrazu.

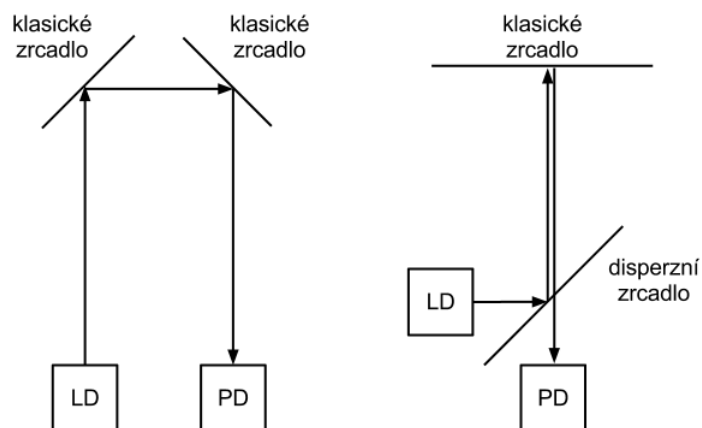
4.1 Zdroj záření

Jako zdroj záření jsem vybral laserovou diodu U-LD-650543A (datasheet [11]). Hlavní kritéria, která jsem při výběru uvažoval, byla dobrá dostupnost, nízká cena a schopnost generovat světelné záblesky o frekvenci minimálně 5MHz. Všechny tyto požadavky splnila právě tato dioda, kterou je možné běžně objednat zároveň její cena nepřesahuje 60kč a její schopnost, generovat dostatečně rychlé světelné pulzy, byla ověřena v bakalářské práci „*Současný obousměrný přenos dat a napájecího signálu jedním optickým vláknem*“ [2].

Další významnou výhodou použití právě této diody je integrovaná fotodioda, která je schopná detekce stejně rychlých impulzů. Narozdíl od běžně distribuovaných fotodiod, které jsou pro viditelné spektrum zpravidla výrazně pomalejší, a proto pro můj návrh nevhodné. Z tohoto důvodu jsem se rozhodl použít dvě stejné diody, jednu jako zdroj světla a druhou jako detektor.

4.2 Schéma odrazu

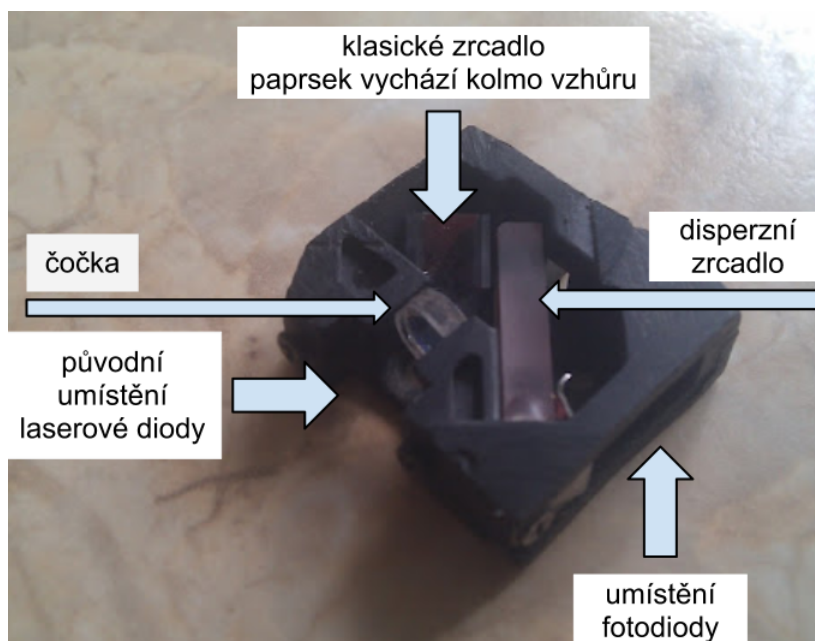
Při výběru vhodného uspořádání odrazové soustavy, jsem vycházel ze dvou možných řešení. Jejich uspořádání je naznačeno v obrázku 4.1. Výhodou vlevo naznačené konstrukce je jednodušší provedení přípravku. Hlavní nevýhodou jsou vyšší nároky kladené na obsluhu a přesnost umístění odrazných zrcadel. Varianta popsaná vpravo je složitější na provedení měřícího přípravku, nicméně je jednodušší pro obsluhu. Obsluha musí zajistit pouze kolmost jednoho zrcadla k paprsku světla. Z tohoto důvodu jsem zvolil konstrukci popsanou na obrázku vpravo. Tato metoda využívá vlastností disperzního zrcadla, to je polopropustné zrcadlo, které část světla odráží a část nechává projít v původním směru.



Obr. 4.1: Znázornění možných uspořádání odrazu. Vlevo – použití se dvěma zrcadly; vpravo – s jedním disperzním zrcadlem a jedním klasickým. LD – laserová dioda (zdroj záření); PD – fotodioda (detektor záření)

4.3 Ostření světla laserové diody

Protože jsem se rozhodl použít diodu U-LD-650543A, z důvodů popsaných v kapitole 4.1, bylo nutné navrhnout ostření diody, tak aby výstupem byl pokud možno rovnoběžný svazek paprsků světla. Hledal jsem způsob mechanického upevnění čočky před diodou, v ohniskové vzdálenosti mezi těmito prvky. Současně bylo výhodné vytvořit, takové mechanické uspořádání, aby jeho součástí bylo i upevnění disperzního zrcadla a později také druhé diody, používané jako detektor.



Obr. 4.2: Optika CD-ROM mechaniky s umístěnou ostřicí čočkou.

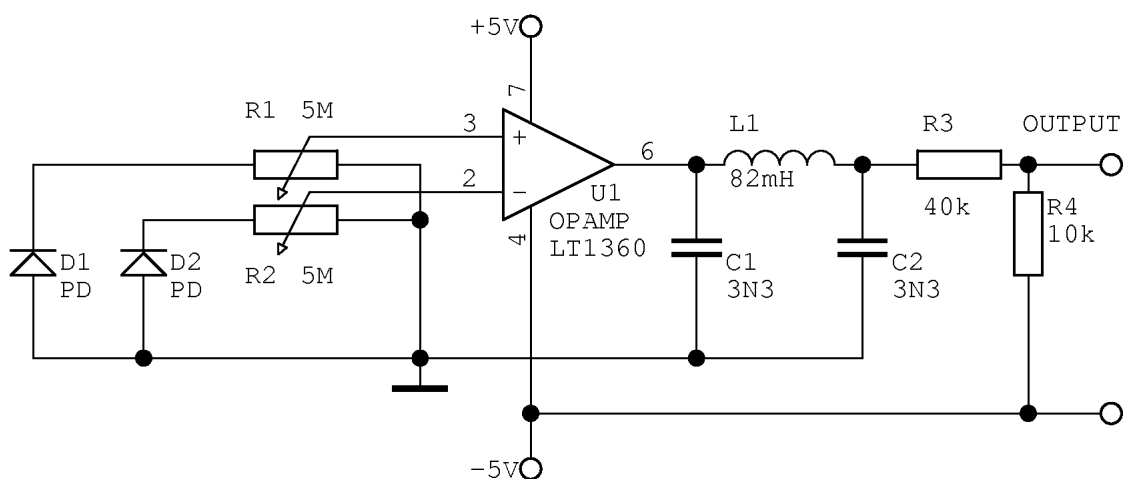
Takovéto uspořádání je velmi podobné uspořádání optiky používané v CD-ROM mechanikách (viz. obrázek. 4.2), DVD-ROM mechaniky jsou zpravidla konstrukčně složitější, a proto ne zcela ideální. CD-ROM mechaniky v některých případech (např. značky TEAC) používají laserové diody ve stejném pouzdře, jako mnou zvolený typ. To výrazně snižuje náročnost úpravy. Pro úpravu je nezbytné rozebrat mechaniku, konkrétně pohyblivý jezdec laseru. Z jezdce se demontují veškeré součástky s výjimkou disperzního zrcadla a klasického zrcadla, jsou na místě připevněny lepidlem a jejich opětovné umístění by bylo problematické. Protože v mechanice, uvnitř tohoto jezdce, není laser ostřen rovnoběžně, je nutné, pouzdro ve kterém je uložena laserová dioda, vyjmout a odříznou vrchní část s čočkou. Poté je možné původní diodu nahradit mnou zvoleným typem. Místo vrchní části pouzdra zaujme čočka používaná v mechanice k zaostření na povrch CD. Ohnisková vzdálenost této čočky je několik milimetrů, zároveň má stejný průměr jako otvor v těle jezdce. Díky tomu ideálně zapadá na pozici a je možné ji snadno upevnit podle potřeby.

5

Obvod úpravy signálu

5.1 Komparátor

Při návrhu komparátoru jsem vycházel ze zapojení operačního zesilovače v tomto režimu. Protože zařízení pracuje s relativně vysokými frekvencemi, bylo nutné použít operační zesilovač LT1360 (datasheet [12]). Tento zesilovač je možné použít až do frekvence 50MHz harmonického signálu. Tudíž by měl být schopný pracovat s obdelníkovým průběhem o frekvenci 5MHz. Schéma je zobrazeno na obrázku 5.1. Na kladný vstup operačního zesilovače je připojena fotodioda zaznamenávající vysílaný signál D1, na záporný vstup je připojena fotodioda detekující vracející se signál D2. Obě diody jsou připojeny přes potenciometry R1 R2, tak aby bylo možné nastavit, že dioda D2 bude mít vždy vyšší napětí při stejném stavu.



Obr. 5.1: Schéma komparátoru.

Napájení komparátoru bude zajišťovat dvojice samostatných stabilizátorů 7805 a 7905. Napájení těchto stabilizátorů bude provedeno externím laboratorním zdrojem, kterým bude dodáváno symetrické napětí $\pm 7 - 15V$. Takto široký rozsah napájení je umožněn použitím výkonových stabilizátorů. Protože napájecí proudy komparátoru jsou nízké, ztrátový tepelný výkon nepřesáhne katalogovou hodnotu těchto součástek.

5.2 Filtr

Výstup komparátoru je přiváděn na filtr. Filtr slouží k odstranění střídavých složek signálu. Tím dostáváme stejnosměrnou složku, ta je přímo úměrná střídě. Protože výstup komparátoru přechází z kladné polarity na zápornou, je výstupní signál vyveden mezi výstupem komparátoru a zápornou napájecí větví. Tím zajistíme pouze kladný výstup, tak aby bylo možné zpracování A/D převodníkem. Poslední úpravou signálu, je úprava jeho amplitudy pro rozsah převodníku. To zajišťuje odporový dělič. Mikroprocesor používá vnitřní zdroj referenčního napětí, tím je rozsah převodníku omezen přibližně na $0 - 2,5V$. Proto je odporový dělič potřeba nastavit přibližně na hodnotu $\frac{1}{4}$, konkrétní nastavení hodnoty bude zajištěno při oživování přípravku a při následné prvotní kalibraci.

6

Číslicové zpracování a zobrazení

Pro řízení mého přípravku jsem zvolil mikroprocesor AVR firmy ATMEL, z nabízených typů jsem vybral Atmega8-16PU (datasheet [8]). Tento mikroprocesor obsahuje 6-ti kanálový 10 bitový AD převodník, dále obsahuje 8kB paměti pro program, tři porty, několik čítačů a další části. Pro použití v měřícím přípravku bude použit právě výše zmíněný AD převodník na jednom pinu portu C. Na další pin tohoto portu bude připojeno jen ovládací tlačítko, zbylé piny jsou vyhrazeny pro další tlačítka v případě, že by byla potřeba rozšířit funkce zařízení. Port D je celý vyhrazen pro komunikaci s displejem. Port B je z části použit jako ISP sběrnice, sloužící pro programování čipu v obvodě. Další dva piny je možné zapojit jako ovládání podsvícení a kontrastu displeje, tyto piny lze obejít mechanickým nastavením. Poslední pin portu je vyhrazen pro spouštění generátoru napájecího signálu pro laserovou diodu.

Napájení mikroprocesoru a LCD displeje zajišťuje samostatný stabilizátor 7805 připojený na kladnou napájecí svorku přípravku. Zdroj napájecího napětí je popsán v kapitole 5.1.

6.1 Výběr zobrazovače

Jako zobrazovací prvek jsem vybral LCD displej MC0802A-SYL/H s řadičem od firmy Samsung S6A0069. Tento displej zobrazuje dva řádky po osmi znacích. Je velice kompaktní a levný. Více informací viz. datasheet [9].

6.2 Generátor napájecího signálu pro diodu

Pro generování signálu, který spíná laserovou diodu jsem zvolil integrovaný oscilátor generující obdelníkové pulzy LTC 1799 (datasheet [10]). Tento oscilátor vyrábí firma Linear Technology, hlavní výhodou tohoto řešení je možnost nastavení výstupní frekvence od 1kHz do 33MHz, dále pak frekvenční stabilita a maximální výstupní proud 50mA, který stačí pro přímé napájení laserové diody.

Výhoda samostatného oscilátoru, je v možnosti nastavit specifickou frekvenci pro měření. Tato frekvence, jak bylo zmíněno v kapitole 2.2 *Návrh měřícího přípravku*, ovlivňuje vzdálenost, na kterou je možné rychlost měřit. Tím je možné nastavit optimální vzdálenost vzhledem k prostorám laboratoře, tato změna se musí projevit v nastavení konstant v programu mikroprocesoru.

6.3 Programování mikroprocesoru

Pro maximální zjednodušení obsluhy bylo celé ovládání z redukováno na jediné tlačítko. Po připojení přípravku k napájení dojde k spuštění mikroprocesoru. Ten v tuto chvíli drží vypnutý generátor signálu pro diodu. Po krátkém stisku tlačítka dojde k sepnutí generátoru a začne probíhat měření. Na displeji se bude průběžně zobrazovat aktuální doba zpoždění. Měření probíhá do doby opětovného stisku tlačítka, tím se přípravek přepne zpět do režimu stand-by. Protože celé měření je navrženo, tak aby se měřil rozdíl zpoždění ve dvou vzdálenostech odrazné plochy, je přípravek vybaven funkcí „kalibrace“. Tato funkce je spouštěna v průběhu měření dlouhým stiskem tlačítka. V okamžik spuštění této funkce dojde k uložení okamžité hodnoty zpoždění do paměti. Tato hodnota bude, od tohoto okamžiku, odečítána od aktuálně naměřené hodnoty. Výsledek zobrazovaný na displeji, tedy bude rozdíl zpoždění od okamžiku kalibrace. Celý program je uveden v příloze B.

7

Oživení a kalibrace měřicího přípravku

7.1 Oživení desky plošného spoje

V úvodu ožívování desky, nastavíme na jumperu J1 (viz. schéma v příloze C.2) první pozici. Tím vypneme podsvícení displeje, které v tuto chvíli nepotřebujeme. Na jumperu J2 nastavíme manuální řízení kontrastu displeje. Potenciometr R2 otočíme přibližně do střední polohy svého chodu. Na desce komparátoru nastavíme potenciometr R3 na nejvyšší hodnotu, tím je zajištěno aby se na výstupu komparátoru neobjevilo napětí, které by mohlo poškodit vstup mikroprocesoru. Nyní připojíme napájení k laboratornímu zdroji se staženým napětím na minimum. Poté, při průběžné kontrole vstupního proudu, budeme napětí zvyšovat. Napájecí proud by neměl přesáhnout 120mA. Vyšší proud může signalizovat zkrat na desce plošného spoje, v takovém případě je potřeba zdroj okamžitě odpojit a desku důkladně zkontrolovat.

Po dosažení úrovně napájení určené pro běžný chod přípravku ($\pm 7 - 15V$) přistoupíme k připojení programátoru mikroprocesoru na sběrnici ISP. Nyní nahrajeme program připojený v příloze B. Po úspěšném naprogramování odpojíme programátor a přípravek restartujeme odpojením a připojením napájecího napětí. Nyní by již displej měl zobrazit "t= [ns]". Pokud je text špatně čitelný upravíme kontrast pomocí potenciometru R2. V tuto chvíli je oživení kompletní a můžeme přejít ke kalibraci zařízení.

7.2 Kalibrace měřicího přípravku

7.2.1 Kalibrace generátoru

Kalibrace generátoru napájecího signálu probíhá tak, že připojíme výstup generátoru na osciloskop případně čítač frekvence. Poté stiskneme ovládací tlačítko přístroje. Tím dojde k přivedení napájení na oscilátor. Nyní pomocí potenciometru R4 (viz. C.2) nastavíme frekvenci na hodnotu, kterou máme určenou v programu. Základní frekvence je 5MHz. Přesnost měření přípravku je přímo úměrná přesnosti nastavení frekvence generátoru, proto by jsme měli volit vždy ten nejpřesnější čítač, který máme k dispozici.

7.2.2 Kalibrace bloku úpravy signálu

V první fázi kalibrace nastavíme výstupní napětí bloku úpravy signálu. Tato kalibrace se provádí, tak že na kladný vstup operačního zesilovače přiložíme kladné napětí (2V). Fotodiodu v tuto chvíli nemusíme odpojovat, protože v závěrném směru vydrží napětí 30V. Tím docílíme výstupní úrovní odpovídající fázovému posunu 180°. Nyní budeme měřit výstupní napětí tohoto obvodu. Postupnou změnou hodnoty potenciometru R3 docílíme výstupního napětí 2,4975V, která odpovídá hodnotě A/D převodníku 1000. Všimněme si že nepoužíváme celý rozsah převodníku 1024, to je z důvodu usnadnění výpočtu.

Ve druhé fázi nastavíme hodnotu potenciometrů R1 a R2 na desce komparátoru. Tyto potenciometry slouží pouze k zajištění vyšší úrovně napětí na diodě D2, proto můžeme ponechat potenciometr R2 v koncové poloze, tak že se napětí této diody nedělí. Potenciometr R1 nastavíme při běhu přístroje. Připojíme osciloskop na vstupy komparátoru. Potenciometr nastavíme na takovou hodnotu, aby se úroveň napětí při osvitu na kladném vstupu pohybovalo v rozmezí mezi hodnotou při osvitu a mimo ni na záporném vstupu. Splnění této podmínky by jsme měli zkontrolovat při umístění odrazné plochy těsně před přípravkem a v nejvzdálenější poloze. Aby byla zajištěna správná funkce přípravku.

8

Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout měřicí přípravek pro úlohu Měření rychlosti světla přímou metodou. Tento úkol byl splněn.

Při průzkumu historie tohoto měření, bylo zajímavé zjistit, že i jedny z prvních metod jsou velice inspirativní a jejich odvozené varianty byly používány i v moderní historii.

Z pohledu samotného návrhu jsem se potýkal s několika problémy. V optické části byla největším problémem fyzická realizace. Zde jsou kladeny veliké nároky na umístění čočky a disperzního zrcadla. Tento problém se mi podařilo vyřešit použitím optiky z CD-ROM mechaniky, kde již je vyřešeno upevnění laserové diody i dalších optických prvků.

V části pro úpravu signálu, bylo problematické vybrat takový operační zesilovač, který by uměl pracovat se signálem o frekvenci 5MHz s obdelníkovým průběhem. Na veškeré části zpracovávající signál je kladen velký důraz na zpoždění, které by mělo být co nejmenší. Naštěstí není dnes problém objednat takovéto operační zesilovače, i když to nejsou zcela běžné součástky.

Samotný návrh části s mikroprocesorem nebyl příliš problematický. Propojení s LCD displejem je celkem běžné a popsáno v dostupných materiálech. Spuštění A/D převodníku je relativně podrobně popsáno v datasheetu [8] a na stránkách AVR GUIDE [7]. Zajímavé je využití integrovaného oscilátoru LTC1799. Velice usnadňující je použití tohoto oscilátoru s laserovou diodou U-LD-650543A. Díky malému výkonu této diody, je možné ji napájet přímo výstupem oscilátoru s předřadným odporem.

Výsledkem této práce je návrh kompaktního měřicího přípravku, který je vhodný pro laboratorní měření v rámci výuky. Použití tohoto přípravku přináší hlavní výhody ve velmi snadné obsluze a názornému měření. Navíc díky použití pouze 5mW laserové diody nehrozí bezprostřední zdravotní riziko, protože i když se jedná o laserový paprsek, jeho energie nepoškodí zrak okamžitě. Vzhledem k tomu, že je laserový paprsek ve viditelném spektru nehrozí dlouhodobé nevědomé ozáření oka, při kterém by mohlo dojít k poškození.

Jako hlavním přínosem této práce, je pro mne praktické využití znalostí z širšího pole elektrotechniky od analogového řešení až po číslicové a jejich vzájemné propojení. Celá práce je koncipována tak, aby bylo možné dále pracovat a rozšiřovat funkce měřicího přípravku.

Literatura

- [1] Kaizr, Václav. *Měření rychlosti šíření světla*. Aldebaran Bulletin, Speciál A (vyšlo 13. července), ročník 2 (2004). ISSN: 1214-1674. Dostupné z: <http://www.aldebaran.cz>
- [2] Baura, Tomáš. *Současný obousměrný přenos dat a napájecího signálu jedním optickým vláknem*. Vysoké uční technické v Brně, Bakalářská práce, 2010. Dostupné z: <http://www.vutbr.cz>
- [3] Pokorný, Aleš. *Bezkontaktní měření otáček ventilátoru*. Vysoké uční technické v Brně, Diplomová práce, 2010. Dostupné z: <http://www.vutbr.cz>
- [4] Srnka, Lukáš. *Měření rychlosti světla*. Masarykova univerzita, Diplomová práce, 2010. Dostupné z: <http://is.muni.cz/th/106928/prifm/>
- [5] *Speed of Light*, http://en.wikipedia.org/wiki/Speed_of_light
- [6] *Rychlost světla*, http://cs.wikipedia.org/wiki/Rychlost_svetla
- [7] *AVR GUIDE*, <https://sites.google.com/site/qeewiki/books/avr-guide>
- [8] *Mikroprocesor ATMEGA8-16PU*, <http://www.gme.cz/dokumentace/432/432-027/dsh.432-027.1.pdf>
- [9] *Displej MC1602A-SYL/H*, <http://www.gme.cz/dokumentace/513/513-122/dsh.513-122.1.pdf>
- [10] *Oscilátor LTC1799*, <http://cds.linear.com/docs/Datasheet/1799fc.pdf>
- [11] *Laser Diode U-LD-650543A*, <http://www.uocnet.com/pdf/LD/U-LD-650543A..pdf>
- [12] *Operační zesilovač LT1360*, <http://cds.linear.com/docs/Datasheet/1360fa.pdf>

Příloha A

Zadání původní měřicí úlohy

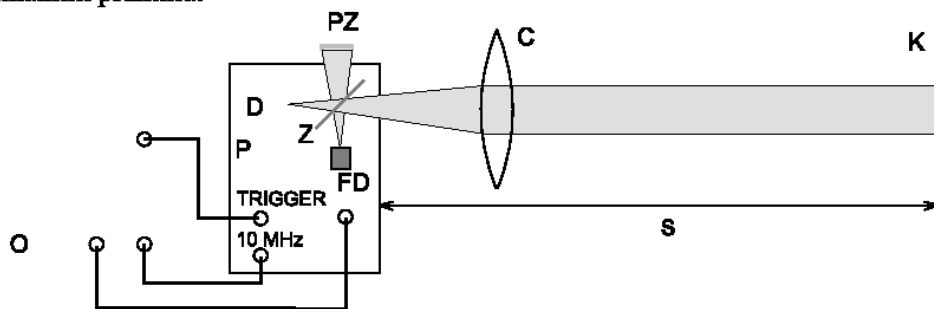
Měření rychlosti světla

a) Úkol

Změřte rychlost světla ve vzduchu přímou metodou.

b) Výklad

Ve středoškolských učebnicích se často jako nejnázornější způsob měření rychlosti světla uvádí Fizeauova metoda. K jejímu laboratornímu ověření ve škole však nedocházelo, protože potřebná vzdálenost zrcadla musí být i při rychle rotujícím přerušovači světla (ozubené kolečko) několik kilometrů. S prostředky moderní elektroniky však lze tuto metodu použít i ve fyzikálním praktiku.



obr. 1

K přerušování světelného paprsku nelze samozřejmě používat ozubených kol, protože nejsme schopni dosáhnout potřebných otáček řádově až tisíce za sekundu. Pro vysílání krátkých impulsů světla nemůžeme ani použít žárovky pro její velkou teplotní setrvačnost a dokonce ani polovodičový laser z ukazovátka. Ten potřebuje k dosažení stavu inverze poměrně velké proudové hustoty a při značné kapacitě přechodu nelze modulovat jeho světlo frekvencí vyšší než několik desítek kHz. Mnohem větší frekvencí lze modulovat světlo běžných svítivých diod (LED), světlo však není kolimováno a je příliš slabé na to, aby bylo možné zachytit odražené světlo od zrcadla vzdáleného několik metrů.

Základem úspěchu je vysokovýkonová svítivá dioda, která je napájena velmi krátkými proudovými impulsy. V použité aparatuře firmy LEYBOLD jsou tyto proudové impulsy tak krátké, že dioda svítí záblesky přibližně 20 ns dlouhými. Světlo z diody D (obr. 1) prochází v přístroji P polopropustným zrcadlem Z a je kolimováno čočkou C do svazku rovnoběžných paprsků. Část odraženého světla od polopropustného zrcadla se po odrazu od pomocného zrcadla PZ vede na fotodiodu FD, z ní je napětí vedeno na jeden z kanálů osciloskopu O. Svazek rovnoběžných paprsků dopadá na vzdálené zrcadlo K, tvořené koutovým odražečem. Ten vrací svazek paprsků zpět k čočce C, která jej po odrazu na polopropustném zrcadle Z fokusuje na fotodiodě FD. Do osciloskopu tedy vstupují dva impulsy: první po odrazu od PZ, druhý po odrazu od K. Protože vzdálenost PZ i okénka

přístroje od polopropustného zrcadla je stejná, bude druhý impuls zpožděn o čas $\tau = \frac{2 \cdot s}{c}$, kde s je vzdálenost koutového odražeče K od přístroje P, c je rychlost světla ve vzduchu. Známe-li τ , je možné vypočítat

$$c = \frac{2 \cdot s}{\tau} \quad (1)$$

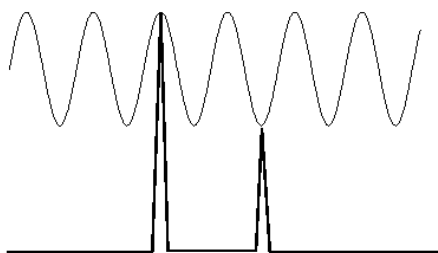
Dobu τ můžeme určit ze vzdálenosti impulsů z fotodiody na osciloskopu. Mohli bychom přitom vycházet z cejchované časové základny, přesnější je však jako měřítka použít harmonického signálu s kmitočtem 10 MHz, který je z P veden na druhý kanál osciloskopu. Protože je časová základna osciloskopu synchronizována výstupem TRIGGER, máme na obrazovce osciloskopu průběhy podle obr. 2. Porovnáním vzdálenosti obou impulsů s periodou 100 ns průběhu 10 MHz je možné zjistit časovou odlehlost τ . Změříme-li s pásmem, můžeme podle (1) vypočítat rychlost světla.

c) Potřeby

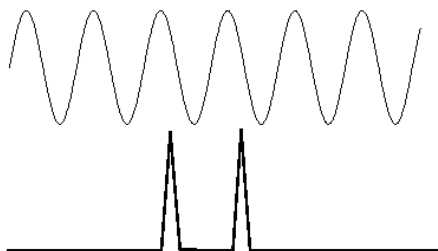
Souprava se svítivou diodou, fotodiodou, zdrojem a koutovým odražečem, dvojkanálový osciloskop, pásmo, olovnice.

d) Postup při měření

1. Zasuňte zdroj 12 V do sítě spusťte přístroj se svítivou diodou a fotodiodou.



obr. 3



obr. 2

2. Koutový odražeč umístěte asi 15 m od svítivé diody tak, aby byl rovnoměrně osvětlen svítivou diodou (to je možné zjistit pozorováním zdroje světla po stranách koutového odražeče).
3. Zapněte osciloskop a ovládacími prvky pro kmitočtení časové základny, svislý i vodorovný posuv paprsků a nastavením zesílení obou kanálů se snažte přiblížit co nejvíce průběhu podle obr. 2.
4. Nastavením přesné polohy čočky ve všech směrech se snažte dosáhnout co největší výšky druhého impulsu na spodním paprsku.
5. Upravte polohu pomocného zrcadla tak, aby výška prvního impulsu odpovídala výšce

- druhého impulsu.
6. Nastavením fáze kmitočtu 10 MHz knoflíkem na druhé straně přístroje nastavte jednu ze záporných amplitud na horním paprsku co nejpřesněji k vrcholu prvního z impulsů na spodním paprsku.
 7. Posunutím koutového odražeče nalezněte polohu, kdy vzdálenost obou impulsů na spodním paprsku odpovídá přesně periodě průběhu na horním paprsku ($\tau_1 = T = 10^{-7}$ s.)
 8. Změřte pásmem vzdálenost s_1 . Měřte od okraje přístroje, tak, jak je naznačeno na obr. 1. Měřte na podlaze, průměty určujte olovnicí.
 9. Měření opakujte pro vzdálenosti odpovídající $\tau_2 = \frac{T}{2}, \tau_3 = \frac{3T}{2}, \tau_4 = 2T$. Pro lichý násobek půlperiody je vhodné upravit ovládací prvky průběh na obrazovce osciloskopu podle obr. 3. Při každém měření se všimněte chyby v určení s .

e) Zpracování výsledků měření

1. Z jednotlivých měření vypočítejte 4 hodnoty rychlosti světla.
2. Zhodnoťte chybu, s jakou jste jednotlivá měření prováděli a podle toho určete výslednou hodnotu naměřené rychlosti světla.
3. Porovnejte získaný výsledek s tabulkovou hodnotou.

f) Závěr a hodnocení

Uveďte měřením získanou hodnotu rychlosti světla ve vzduchu a porovnejte ji s hodnotou tabulkovou. Zhodnoťte chyby měření a uveďte vzdálenost, pro kterou je měření optimální. Navrhněte opatření k snížení těchto chyb. Bylo by možné měřit časovou odlehlost obou impulsů čítačem? Je vliv indexu lomu vzduchu na rychlost světla tímto měřením patrný? Má (alespoň teoreticky) na získanou hodnotu vliv denní doba a směr nastavení aparatury? Oba tyto faktory ovlivňují vektor rychlosti laboratoře vůči Slunci. Velikost této rychlosti je asi 30 km/s. Uveďte jiné způsoby měření rychlosti světla. Může člověk svými smysly zjistit, že rychlost světla je konečná?

Příloha B

Program mikroprocesoru

```

#include <mega8.h>
#include <asm>
.equ __lcd_port=0x12 ;PORTD //namapování portů pro LCD dle knihovny "lcd.h"
#include <lcd.h>

#include <delay.h> //knihovna spoždění

#include <avr/io.h> //knihovna vstupu výstupu ATMEGA
#include <stdio.h> //knihovny základních funkcí
#include <stdlib.h>
#include <math.h>

#define xtal 8000000 //definice frekvence kristalu pro fci "delay.h"

#define OUTPUT PORTB.0 //definice výstupu který spoští generátor pro laser
diodu
#define INPUT PINC.5 //definice vstupu A/D převodník

#define TL1 PINC.4 //definice vstupu pro ovládací tlačítko 1
//define TL2 PINC.3 //definice vstupu pro ovládací tlačítko 2 - není
provedeno
//define TL3 PINC.2 //definice vstupu pro ovládací tlačítko 3 - není
provedeno
//define TL4 PINC.1 //definice vstupu pro ovládací tlačítko 4 - není
provedeno

unsigned char pom[8]; //pomocná proměná pro znak na LCD
int frek=5; //frekvence signálu LD, v MHZ

void ADC_Init(void) //inicializace A/D převodníku
{
ADMUX=0xC5; //nastavení vnitřní ref. hodnoty napětí, pinu C5, plného 10b
rozlišení
ADCSRA=0xAF; //nastavení děliče taktu pro AD, příprava ke spuštění
}

int RADC(void) //čtení z ADC
{
int LADC;//proměná spodních 8bitů
int HADC;//proměná horních 2bitů

LADC = ADCL;
HADC = ADCH;
HADC <<= 8;
HADC |= LADC;
HADC |= LADC;
return = HADC;
}

void main(void)
{
int merit=0, zmereno=0, vysledek=0;
int kalibrace=0;
int TL1;

//inicializace portu D - všechny piny jako výstup
State0=0
PORTD=0x00;
DDRD=0xFF;
//inicializace portu C - všechny piny jako vstup
State0=T
PORTC=0x00;
DDRC=0x00;
//inicializace portu B - B0,B1,B2 vystupy
PORTB=0x00;
DDRB=0x06;

ADC_Init(); //inicializace ADC

```

```

lcd_init(8); //inicializace LCD
lcd_clear(); //smaze displej
lcd_gotoxy(0,0); // kurzor na souradnice 0,0

for (int i = 0; i < 9; i++){ //náběh při spuštění
lcd_putsf("*"); //vypis textu
delay_ms(250);
}
lcd_clear(); //vymzání displeje
lcd_gotoxy(0,0);
lcd_putsf("t= [ns] "); //vypsání záhlaví

while(1){ //nekonečný cyklus

if (merit==1)
{
ADCSRA |= (1 << ADSC); //spuštění ADC

zmereno=RADC(); //vlastní načtení hodnoty ADC

vysledek=zmereno-kalibrace; //kalibrační fce
vysledek/=Frek; //výpočet výsledné hodnoty

itoa(vysledek,pom); //převod na zobrazitelnou proměnou

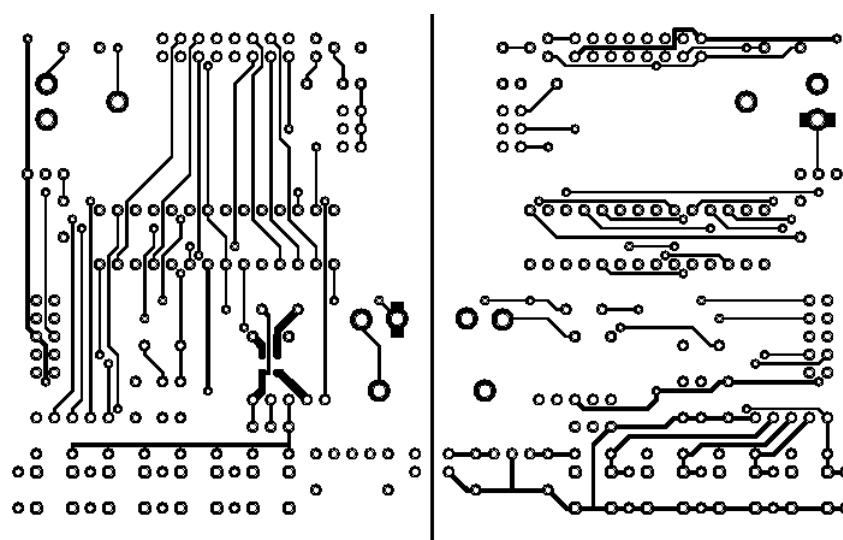
lcd_gotoxy(0,1);
lcd_putsf(" "); //smazání řádku před zapsáním nové hodnoty
lcd_gotoxy(0,1);
lcd_putsf(pom); //výpis výsledku
delay_ms(500); //rychlost měření
}
else
{
if (ADSC==1) { //pokud ADC běží
ADCSRA |= (0 << ADSC); //vypnutí ADC
lcd_clear();
lcd_gotoxy(0,0);
lcd_putsf(" Stop ");
delay_ms(1000);}
delay_ms(100);
};

if (TL1==1) //vyhodnocení krátký/dlouhý stisk
{
delay_ms(2000);
if (TL1==0 && merit==0){ merit=1; //když ktátký změna hodnoty proměny merit
lcd_clear();
lcd_gotoxy(0,0);
lcd_putsf("t= [ns] ");
}
if (TL1==0 && merit==1){ merit=0;}
if (TL1==1){ kalibrace=zmereno; //když dlouhý uložení aktuální hodnotu
lcd_gotoxy(0,0);
lcd_putsf("ulozeno ");
delay_ms(1000);}}
};
};

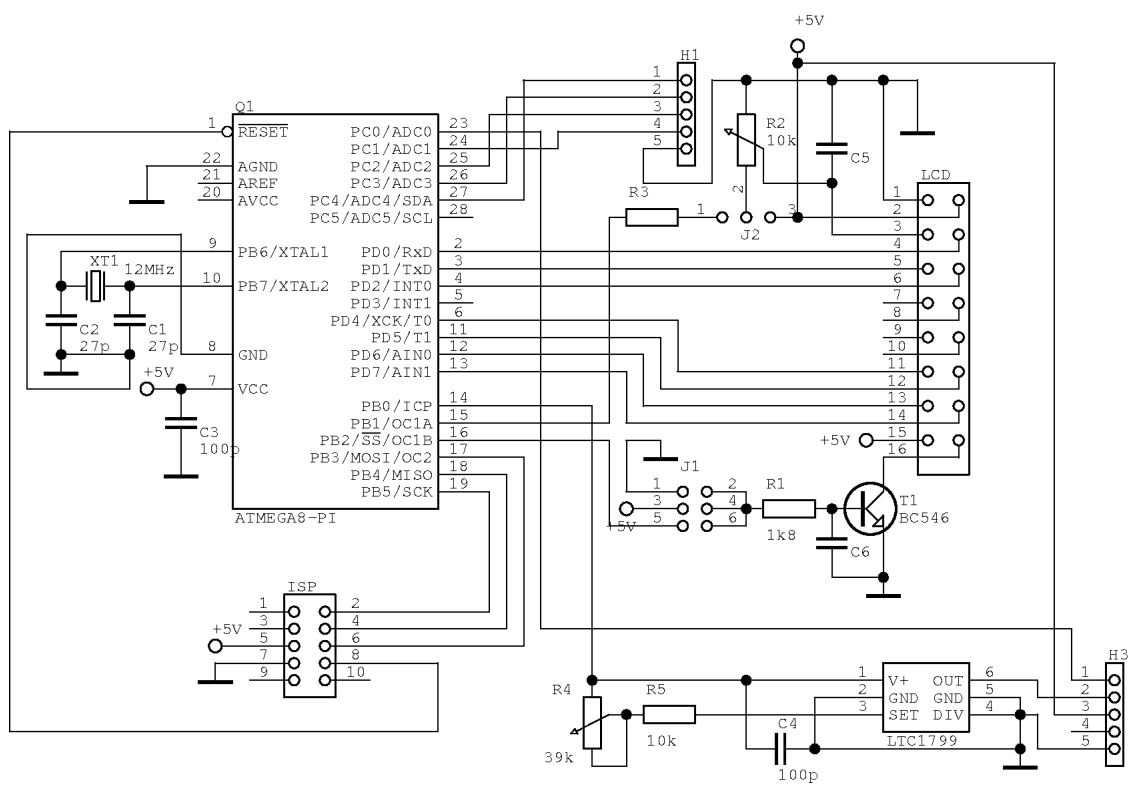
```

Příloha C

Mikroprocesor DPS, schema



Obr. C.1: Deska plošného spoje. Vlevo pohled z hora.



Obr. C.2: Schema zapojení mikroprocesoru