VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

MĚŘENÍ RYCHLOSTI STŘEL POMOCÍ LASEROVÉHO PAPRSKU
MEASURING THE VELOCITY OF PROJECTILES BY LASER BEAM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR´S THESIS

AUTOR PRÁCE — JAROSLAV ŠMERDA
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. ZBYNEK LUKEŠ, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2011

LICENČNÍ SMLOUVA
POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení:	Jaroslav Šmerda
Bytem:	Lelekovice 317, 664 31
Narozen/a (datum a místo):	16. srpna 1987 v Brně

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida, předseda rady oboru Elektronika a sdělovací technika
(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1
Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

   ☐ disertační práce
   ☐ diplomová práce
   ☒ bakalářská práce
   ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
   .....
   (dále jen VŠKP nebo dílo)

   Název VŠKP: Měření rychlosti střel pomocí laserového paprsku
   Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Zbyněk Lukeš, Ph.D.
   Ústav: Ústav radioelektroniky
   Datum obhajoby VŠKP: _____

   VŠKP odevzdal autor nabyvateli*:

   ☒ v tištěné formě – počet exemplářů: 2
   ☒ v elektronické formě – počet exemplářů: 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.

3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.

4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

* hodící se zaškrtněte

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizovaní výpisů, opisů a rozmnoženin.

2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.

3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti

   - ☒ ihned po uzavření této smlouvy
   - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
   - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
   - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
   - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy

   (z důvodu utajení v něm obsažených informací)

4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.

2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.

3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísni a za nápadně nevýhodných podmínek.

4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 26. května 2011

……..	……
Nabyvatel	Autor

ANOTACE

Úsťová rychlost zbraně je rychlost kulky v okamžiku kdy opustí hlaveň zbraně. Protože se jedná o parametr spojený s ději, které se odehrávají jen krátce po tom, co střela opustí hlaveň, patří tento údaj do přechodové balistiky. Cílem této práce je navrhnout a zkonstruovat přístroj na měření této rychlosti. Měření spočívá ve změření intervalu, ve kterém střela protne dva laserové paprsky. Z tohoto údaje bude vypočtena výsledná rychlost.

ANNOTATION

Muzzle velocity is the speed of bullets, guns at the moment it leaves the barrel of a gun. Since this is a parameter related to the storyline, which takes place only shortly after the bullet leaves the barrel, this figure is the transition ballistics. The aim of this work is to design and construct a device for measuring the speed. Measurement consists in measuring the interval at which the bullet crosses the two laser beams. From this data, the performance will be calculated.

Klíčová slova:

rychlost, střela, mikroprocesor, balistika

Keywords:

speed, bullet, microprocessor, ballistics

Bibliografická citace práce:

ŠMERDA, J. *Měření rychlosti střel pomocí laserového paprsku.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 44 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zbyněk Lukeš, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma Měření rychlosti střel pomocí laserového paprsku 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 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 § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 25. května 2011 .....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Zbyňkovi Lukešovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 25. května 2011 .....
podpis autora

Obsah

1 Úvod..... 1
2 Balistika..... 2
3 Airsoft..... 5
4 Chronometry a chronografy..... 7
5 Návrh provedení a rozměrů přístroje..... 10
6 Návrh elektronické části přístroje..... 14
7 Návrh programu..... 25
8 Závěr..... 32
9 Seznam použité literatury..... 33
10 Seznam použitých zkratek a symbolů..... 34
11 Příloha..... 35

1 Úvod

Přístroje na měření úsťové rychlosti zbraně se nazývají chronometry nebo chronografy. Tyto přístroje jsou využívány lidmi, kteří vlastní střelnou zbraň a potřebují přeměřit její parametry. Nejčastěji jsou využívány v airsoftu nebo ve sportovní střelbě. Přístrojů tohoto typu je více druhů, některé přístroje jsou přesné, některé jednoduché a skladné, některé umí změřit více parametrů než jen úsťovou rychlost zbraně, ale všechny mají jednu věc společnou, jsou hodně drahé, vzhledem k tomu kolik toho dokážou. Cílem této bakalářské práce je tak navrhnout podobný měřicí přístroj, který bude vybaven řadou funkcí, bude spolehlivý a přitom nebude mít vysoké náklady.

První částí samotného návrhu je určení provedení přístroje a určení nejdůležitějších rozměrů. Určení provedení přístroje spočívá především v rozhodnutí, jaký zvolíme způsob snímání letících projektilů. Každý způsob snímání má svoje výhody a nevýhody. Vlastnosti, které takto u snímačů posuzujeme, jsou rozměry, konstrukční složitost, spolehlivost a schopnost snímat projektily různých velikostí. Po zvolení způsobu snímání musíme určit nejdůležitější rozměry podle složitosti provedení, praktické použitelnosti a pohodlnosti použití, rozsahu velikostí měřených střel a technologické proveditelnosti.

Druhou částí je vypočítání potřebných parametrů pro možnosti při výběru správného mikroprocesoru. Při výběru mikroprocesoru záleží především na pracovní frekvenci, velikosti časovače a počtu vstup/výstupních pinů. Z výpočtů podle těchto parametrů můžeme určit přesnost a rozsah měřicího přístroje. Podle počtu vstup/výstupních pinů můžeme použít různé ovládací a zobrazovací prvky nebo přídavné periférie.

Třetí částí je navrhnutí desky plošných spojů. Rozhodnutí, které prvky bude zapojení obsahovat, jak budou zapojeny a kde budou umístěny na desce.

Čtvrtou částí je návrh programu. Protože měřicí přístroj, který chceme navrhnout, by měl mít pokročilé funkce, je třeba zjistit, co všechno se dá ze změřených údajů dále vypočítat a určit výpočet, který může být aplikován do programu. Jednotlivé funkce by měly být uspořádány v programu podle přehledného blokového schématu. Dostatek ovládacích prvků by měl zajistit bezproblémové intuitivní a snadné ovládání.

2 Balistika

Balistika je věda, která se za pomocí čisté aplikace fyzikálních zákonů, zabývá pohybem a účinkem střely. Balistika jako věda se dále dělí na čtyři podobory:

- vnitřní balistika
- přechodová balistika
- vnější balistika
- koncová (terminální) balistika

Vnitřní balistika se zabývá ději a pohybem střely v hlavni. Pohyb střely v hlavni patří k nejextrémnějším dějům klasické fyziky, při kterých působí vysoké teploty a velké síly a rychlosti. Matematický popis a zpracování těchto dějů je tak složité, že i s pomocí nejmodernější výpočetní techniky se daná problematika řeší velmi obtížně. Mezi základní vnitrobalistické veličiny patří tlak a teplota plynů, rychlost a dráha střely, množství shořelého prachu apod.

Přechodová balistika zkoumá pohyb střely od ústí hlavně až po vymizení všech rušivých vlivů zbraně, prachových plynů a ukončení zrychlování střely, což je přibližně desetinásobek až dvacetinásobek průměru hlavně. Tato část balistiky je vlastně speciální částí vnější balistiky, do které spadá i téma této bakalářské práce.

Vnější balistika se zabývá celým pohybem střely od opuštění hlavně až po dopad. Přestože na střelu působí spousta rušivých vlivů při opuštění hlavně (přechodová balistika) i při letu volným prostorem, zabývá se vnější balistika především působením základních dvou sil, působících na letící střelu: tíhové síly a síly odporu vzduchu. Jsou to právě tyto dvě síly, ze kterých počítáme rovnici pro známou balistickou křivku.

$$F = F_g + F_{od} \quad (1)$$

kde F_g je tíhová (gravitační) síla:

$$F_g = m \cdot g \quad (2)$$

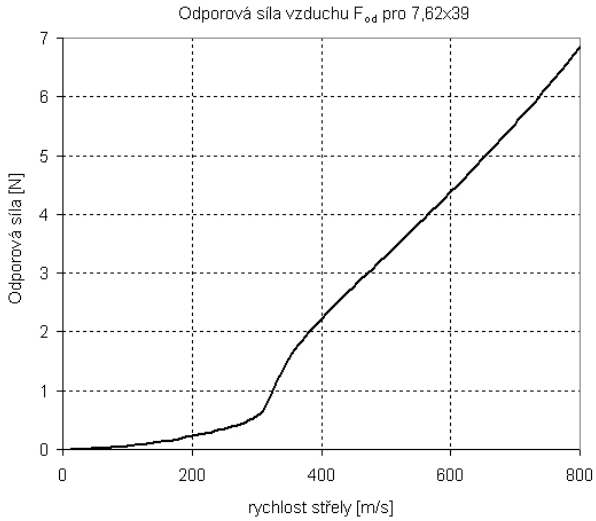
m ..... hmotnost střely
g ..... gravitační zrychlení

a F_{od} je síla odporu vzduchu:

$$F_{od} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot S \cdot \rho \cdot v^2 \quad (3)$$

C ..... činitel odporu prostředí závislý na tvaru střely
S ..... plocha průřezu střely
ρ ..... hustota vzduchu (prostředí)
v ..... rychlost střely

Tento vzorec pro odporovou sílu vzduchu je jen přibližným matematickým vyjádřením skutečné křivky závislosti síly odporu vzduchu na rychlosti střely. Ta je závislá na všech těchto parametrech, ale vypadá tak, že pro nízké rychlosti je závislost odporu vzduchu na rychlosti střely téměř lineární a kolem rychlosti zvuku dosahuje až třetí mocnině rychlosti střely. Na odporové síle prostředí závisí více než na gravitační síle, protože odporová síla prostředí je běžně mnohem větší než gravitační síla.



Obr.1: Graf závislosti odporové síly vzduchu na rychlosti střely (převzato z [2])

Pokud počítáme balistiku ručních zbraní, vystačíme si většinou s těmito dvěma silami, ale pokud chceme vypočítat například místo dopadu střely z kanónu nebo děla, musíme často zohlednit další faktory působící na střely delšího doletu. Tyto faktory jsou například Coriolisova síla, Magnusova síla, derivace střely a v některých případech i odstředivou sílu.

Coriolisova síla

Coriolisova síla je setrvačná síla působící v rotující neinerciální vztažné soustavě. Těleso, které se pohybuje kolem tělesa rotujícího, se pohybuje vzhledem k rotujícímu tělesu po zdánlivé zpravidla zakřivené dráze, což je způsobeno právě Coriolisovou silou kolmou na směr pohybu. Coriolisova síla je síla zdánlivá. Příkladem může být letadlo, které musí čelit otáčení Země. Aby letadlo doletělo na cílové letiště, musí uletět o tolik více či méně o kolik se otočila za dobu letu naše planeta. Ta se samozřejmě otáčí i se vzduchem na planetě takže tato síla nemá na letadla tak moc velký vliv ale působení Coriolisovy síly zde je také. V balistice se počítá s Coriolisovou silou tehdy, když střela, kterou vystřelíme, letí delší dobu a my musíme upravit předpokládané místo dopadu střely o takovou vzdálenost, o jakou se za tu dobu posunula země. V příkladu uvedeném ve zdroji [2] při střelbě na 18 km může být odchylka vlivem této síly až téměř 80 m. V případě dalekonosných děl s dostřelem 130 km (Tlustá Berta) nebo i víc (údajné dělo Babylon), mohla být odchylka i více než 1 km vzhledem k tomu, že využívaly toho, že vystřelili střelu do vyšších vrstev atmosféry, ve kterých je řidší vzduch a měly tam letět třeba 3 minuty, čímž také měly mít větší dostřel.

Derivace střely

Protože střela se pohybuje s nenulovým úhlem mezi osou střely a tečnou k dráze, nejsou vektory rychlosti střely a odporu vzduchu rovnoběžné. Vektor odporu vzduchu tak můžeme rozdělit na vztlakovou sílu a čelní tlak. Protože odpor vzduchu nepůsobí v těžišti střely a střela rotuje, vzniká derivace střely a tím vzniká stranová odchylka ve směru rotace. Při výpočtu derivace střely je třeba znát rychlost rotace střely a ta klesá vlivem tření.

Magnusova síla

Magnusova síla je boční síla vznikající při Magnusovu jevu. Tento jev popisuje chování rotujícího tělesa obtékaného plynem nebo kapalinou. Rotuje-li těleso proudem, tak na jedné

straně tok proudu zvětšuje a na straně druhé zmenšuje. Vzniká tak síla, která působí směrem k většímu toku proudu, a tuto sílu nazýváme Magnusova síla.

Pokud počítáme s Coriolisovou silou, Magnusovou silou a derivací střely, dostáváme „Modifikovanou trajektorii hmotného bodu“, dnes standardní metoda pro výpočet kanónů a houfnic. Vrcholem vnější balistiky je „Metoda šesti stupňů volnosti“ (Six Degrees of Freedom, 6DOF), která kromě již zmíněných sil zahrnuje i jejich momenty a počítá precesní a nutační pohyb střely během letu.

Koncová (terminální) balistika

Zabývá se pohybem a působením projektilů uvnitř zasaženého objektu. Rozděluje zbraně a střelivo podle použití na přesnost zasažení cíle, maximální poškození cíle maximální penetrací, maximální poškození cíle řízenou deformací střely, z hlediska obrané střelby ještě rychlost zastavení protivníka.

3 Airsoft

Airsoft je moderní sport vojenského typu, kdy se používají funkční věrohodné modely zbraní, ve kterých se jako střelivo používají plastovo-keramické kuličky o průměru 6 nebo 8 mm. Airsoft vznikl na východě Asie, kde v některých státech bylo obtížné pořizování si ostrých zbraní vzhledem k místním zákonům, proto se lidé pokoušeli najít jinou alternativu. Proto v téhle oblasti airsoft nejen vzniknul, ale stále je zde velice oblíben a vyrábí se zde většina zbraní a příslušenství.

Ačkoliv jde o hru vojenského typu, jsou zde přísně zakázány veškeré projevy agrese, naopak hráči musí být dost čestní, aby byli schopni uznat, že je někdo zasáhl, protože ostatní hráči nejsou schopni většinou poznat, zda byl nebo nebyl zasažen. Zasažený hráč zahlásí, že byl zasažen, zvedne ruce a odchází na tzv. „mrtvoliště“, kde čeká na konec hry. Hráči musí respektovat další pravidla jako nestřílení do mrtvých, mrtví také nesmí s živými hráči komunikovat a nesmí jinak zasahovat do průběhu hry. Protože se v airsoftu používají zbraně s úsťovou rychlostí až 200 m/s, patří mezi povinnou výbavu ochranné brýle. Mezi další vybavení patří zpravidla maskovací oblečení, vysílačky nebo slabá pyrotechnika. Nejdůležitější je samozřejmě samotná zbraň, jedná se o nejčastěji o modely skutečných zbraní v měřítku 1:1, takže jsou od skutečných zbraní špatně rozeznatelné. Pokročilejší hráči si svoje zbraně vylepšují o různé vybavení nebo vylepšení podle toho, zda jim jde o co nejrealističtější zbraň nebo co nejvýkonnější zbraň. Airsoftové zbraně patří podle zákona do „zbraní kategorie D“, což znamená, že je může vlastnit, držet a nosit osoba starší 18 let aniž by potřebovala zbrojní průkaz. Nesmí ji však viditelně nosit na veřejnosti a nesmí s ní na veřejnosti střílet nebo ohrožovat osoby nebo poškozovat majetek.

Zbraně dělíme na:

Manuální krátké: Jedná se o nejlevnější verze zbraní s nízkou úsťovou rychlostí (do 60 m/s), malým doletem a horší přesností. Tyto zbraně používají nejlehčí kuličky hmotností 0,12, 0,20 a 0,25 g. Stejně jako ostatní manuální zbraně je potřeba je po každém výstřelu znovu natáhnout.
Manuální dlouhé: Jsou to manuální zbraně s větším dostřelem a také lepší přesností, mnohdy dosahují svými parametry i hodnot automatických elektrických zbraní, ovšem jsou stále manuální a proto se musí po každém výstřelu znovu natáhnout.
Manuální odstřelovací pušky: Patří sice také mezi manuální zbraně, které je třeba po každém výstřelu natáhnout ale jejich přednost je v jejich přesnosti, jsou to totiž nejpřesnější zbraně, které se dají pořídit. Navíc u odstřelovacích pušek není jejich automatické nabíjení tolik důležité. Jejich úsťová rychlost se pohybuje nad 100 m/s a cena často převýší i elektrické a plynové zbraně. Do těchto zbraní se používají kuličky 0,25 g a těžší.
Plynové: Tyto zbraně se vyrábí v poloautomatickém nebo automatickém provedení. Kulička je vystřelována tlakem plynu, který bývá skladován v nádobě nejčastěji jako součást zásobníku. Tyto zbraně mají velice často zabudovaný zpětný ráz, což z nich dělá nejvěrnější kopie reálných zbraní. Mají ovšem i svoje nevýhody, plyny které se používají, mají totiž při různých podmínkách (především teplotě) různé vlastnosti. Další nevýhodou je vyšší poruchovost a náročnost údržby.
Elektrické: Dnes pravděpodobně nejpoužívanějšími zbraněmi jsou automatické elektrické zbraně, které používají k natažení pístu elektromotor. Jsou to přesné, rychlé, spolehlivé a nepříliš náročné zbraně s možností mnohých vylepšení, na rozdíl od plynových zbraní, kde se vylepšení shání velice těžce. Úsťová rychlost se pohybuje kolem 90 m/s, u odstřelovacích pušek 120 až 150 m/s. Kadence těchto automatických zbraní bývá srovnatelná i s reálnými zbraněmi.

Systém Hop - up

To co náš však nejvíce zajímá je taková balistická zvláštnost využívaná v airsoftu a tou je systém Hop – up, je to metoda která zajišťuje zlepšení přesnosti a doletu kuličky pomocí zpětné rotace. Toho se docílí tím, že se do vrchní části hlavně zbraně vloží gumová nebo silikonová překážka, to způsobí, že se kulička v hlavni roztočí. Přesto, že překážka odebere kuličce určitou energii a rotující kulička v hlavni také přichází o více energie než kulička nerotující, rotace kuličky po opuštění hlavně udrží kuličku v méně zakřivené dráze, než kdyby kulička neměla rotaci. Jak moc ovlivní překážka dráhu letu kuličky, záleží na tom, jak moc je vsunutá do hlavně. Pokud je zasunutá málo, vznikne minimální rotace a odebraná energie v hlavni může zpomalit kuličku více, než jí následně urychlí její nedostatečná rotace. Tohoto extrému se však příliš bát nemusíme, většinou se stává, že pokud je překážka málo zasunuta, dochází jen k nedostatečnému efektu. Pokud však překážku do hlavně zastrčíme až příliš, může docházet k příliš velké rotaci kuličky, což může způsobit, že dráha kuličky po opuštění hlavně směřuje naprosto náhodným směrem, tento jev není příliš častý, ale může se stát, pokud rotující kulička opouštějící hlaveň se neodrazí od vnitřní stěny hlavně ale až její hrany. V případě, že zastrčíme překážku do hlavně hodně, dochází také k zasekávání kuliček v hlavni, protože kuličky překážku nepřekonají, což je nutné řešit demontáží zbraně.

To co je však z fyzikálního hlediska nejzajímavější věcí je to, proč vlastně zpětná rotace má na dolet a přímou dráhu letu kuličky takový vliv. Příčinou je působení Bernoulliho principu (vysvětlující Bernoulliho jev). Daniel Bernoulli (*1700) byl švýcarský fyzik a matematik, zakladatel hydrodynamiky, z níž je nejznámější jeho Bernoulliho rovnice vyjadřující zákon zachování mechanické energie pro ustálené proudění ideální kapaliny. Samotný Bernoulliho princip však s Bernoulliho rovnicí nemá moc společného. Bernoulliho princip je efekt, kterého se využívá například u křídel letadel nebo při golfu nebo jiných míčových sportech. Křídla letadel mají takový tvar, že horní část křídla je více ohnutá a vzduch, proudící kolem křídla musí urazit větší dráhu nad křídlem než pod ním, proto musí vzduch proudící nad křídlem být rychlejší. Tím vzniká nad křídlem menší tlak a křídla nesou letadlo vzhůru. U golfu můžeme pozorovat různě zahnutou dráhu letu míčku, protože na povrchu míčku jsou malé jamky pro větší odpor vzduchu na povrchu míčku a tím zvětšení tohoto efektu. Samotný princip tedy spočívá v tom, že otáčí-li se kulička vzhůru, vzduch, který tlačí před sebou, tlačí vzhůru, kde tak vzniká větší rychlost vzduchu a tím také nižší tlak. Síla, která kuličku vtahuje do tohoto nižšího tlaku, se nazývá Magnusova síla, je to síla kterou jsme si popisovali už výše jako sílu negativně působící na letící střelu, zde ji však z důvodu jiné rotace naopak využíváme. Při letu rotující kuličky působí ještě druhotný efekt, tento efekt má vliv na turbulentní toky vzduchu za kuličkou. Pokud kulička za letu nerotuje, vznikají za ní turbulentní toky, které ji brzdí vzhledem k podtlaku, který vzniká za každým předmětem pohybujícím se vzduchem. Rotující kulička však vzduch, který tlačila nad sebe, tlačí i za sebe a tím zmenšuje vznikající podtlak za ní, turbulentní toky vzduchu se korigují a vytváří tak ještě větší sílu nadnášející kuličku. Tomuto efektu se říká „efekt odklonění stopy“.

U běžných střelných zbraní používáme závitů v hlavních. Hlavní úlohou těchto závitů však není jen zvětšení doletu střely nebo zvýšení přesnosti ale především kvůli udělení střele gyroskopické stability. Pokud by střela běžného aerodynamického podlouhlého tvaru neměla svoji rotaci, nebyla by schopna udržet se své správné dráhy. Samozřejmě pokud má střela svůj aerodynamický podlouhlý tvar je schopna lépe čelit odporu vzduchu, mít delší dolet, větší přesnost, lepší účinek na cíl protože dosahují větších rychlostí. U airsoftu však tak vysokých rychlostí nemůžeme dosahovat z důvodu rizika ublížení na zdraví. Srovnáme-li tedy systém Hop-up se závity v hlavních zbraní, můžeme říci že Hop-up zvyšuje dolet kuličky s vedlejším efektem zvýšení přesnosti a závity v hlavni zvyšují přesnost s vedlejším efektem delšího dostřelu.

4 Chronometry a chronografy

Přesto, že tyto výrazy znamenají vlastně hodiny či hodinky s maximální přesností nebo schopností přesně odměřit krátký časový interval, nejde o tyto přístroje. Jde o přístroje používané v airsoftu pro měření úsťových rychlostí zbraní. Nejde však jen o airsoft, tyto přístroje se používají pro měření úsťových rychlostí (a případně dalších parametrů projektilu nebo zbraně) pro téměř veškeré střelné zbraně.

Tyto přístroje se vyrábí v několika variantách. Nejčastější variantou je, že přístroj obsahuje trubku určitého průměru, ve které jsou dva optické snímače. Signály ze snímačů jsou vyhodnoceny mikroprocesorem a zobrazeny na LCD panelu. Tyto přístroje většinou měří nejen úsťovou rychlost kuličky v m/s ale i v fps (palce za sekundu) a někdy také energii kuličky pro určitou hmotnost kuličky. Uvedu zde několik často používaných přístrojů:

Fidragon Airsoft chronograph chronometer

Tento chronograf už podle obrázku dokáže měřit rychlost kuličky v m/s i ve fps, také měří energii v Joulech pro 0,2g nebo 0,25g vážící kuličku. Funkce se přepínají pomocí dvou tlačítek, měřenou veličinu a jednotku měření. Přístroj je napájen třemi tužkovými bateriemi (AA). Také je vybaven stojánkem. Cena přístroje je přibližně 50$. Ceny uváděné v korunách bývají různé, ovšem kvůli náročnému dovozu z USA bývají o hodně větší.

Obr.2: Chronometr Fidragon (převzato z [6])

G XCortech X3200 Shooting Chronograph

Tento Chronograf měří rychlost v m/s i fps s rozsahem 10 - 400 m/s. Měří energii v Joulech s rozsahem 0,01 – 999 J. Kromě toho měří i kadenci (ROF – rate of fire) a má paměť na 6 naměřených hodnot. Na obrázku můžeme vidět i trubku namontovatelnou na vstupní otvor, to zaručí bezpečnější zacházení i větší pravděpodobnost, že se do vstupního otvoru trefíme. Chronograf má i šroub pro montáž stativu. Napájení řeší čtyři mikrotužkové baterie (AAA). Cena je přibližně 80$.

Obr.3: Chronometr XCortech (převzato z [7])

Speeder 2000

Tímto měřičem lze také měřit rychlost v m/s i v fps, měří i kadenci a energii v Joulech, i když pravděpodobně jen pro jednu váhu kuliček, nejčastěji 0,2g. Všechno je znázorněno na přehledném displeji. Tento přístroj je schopen si zapamatovat až posledních 10 měření. Napájet přístroj můžeme ze sítě nebo z baterie, která má výdrž přibližně 1,5 hodiny. Měřič je vybaven automatickým vypnutím po 2 minutách nečinnosti. Přístroj je možné přimontovat na stativ od fotoaparátu. Cena je 2700 Kč.

Obr.4: Chronometr Speeder(převzato z [7])

Druhým typem chronometru je chronometr, který se přichytí na hlaveň zbraně. Tyto chronometry nebývají příliš přesné, protože mají krátkou měřicí dráhu, protože jsou však na hlavni pevně přichycené, bývají docela spolehlivé. Výhodou je také jejich hmotnost a jejich rozměry. Mezi tyto přístroje patří:

Combro cb-625

Tento přístroj je schopen měřit úsťovou rychlost v m/s i fps. Měří energii v Joulech, ale víc toho neumí. Cena je £40,80.

Obr.5: Chronometr Combro (převzato z [8])

Třetím typem chronometrů jsou hradla. Patří k dražším ale univerzálnějším a kvalitnějším přístrojům než předešlé dva typy. Přístroj se skládá ze dvou rámů, které docela spolehlivě zaznamenají většinu druhů projektilů, které jimi proletí. Díky velikosti těchto rámů odpadá nevýhoda toho, že se může projektil dotknout měřicího přístroje a tím zkreslit výsledek. Bez problémů si lze zde dovolit dát snímací rámy dost daleko od sebe a tím zpřesnit výsledek. Příkladem uvedu přístroj:

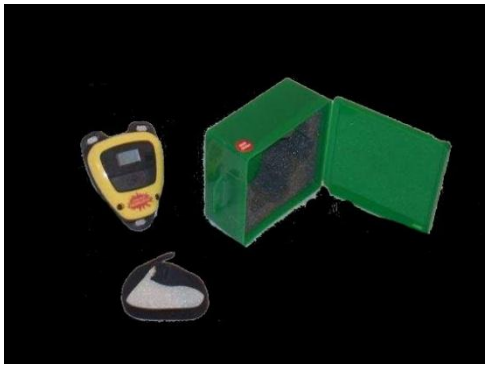
Elektronická hradla BETA

- Mechanicky odolná konstrukce díky kovovému rámu
- Velice kompaktní díky zaklapovacímu mechanismu
- Možnost vylepšení na vyšší verze
- měří rychlost projektilů od 30 do 7000 stop za sekundu (asi od 9 do 2133 m/s)
- váha přibližně 1,2Kg
- napájení 9V baterie s výdrží asi 48 hodin
- možnost montáže na stativ
- kromě rychlosti střely udává nejvyšší, nejnižší a průměrný čas měření
- má paměť na 60 měření rozdělených do 6 skupin „stringů“
- i po vypnutí zůstávají výsledky uloženy
- možnost stažení dat do počítače
- cena této verze je 3755 Kč

Obr.6: Elektronická hradla BETA (převzato z [9])

Vyšší verze umožňují například měření kadence nebo připojení speciální tiskárny pro přímý tisk naměřených hodnot.

Takovou zvláštností by mohl být další typ těchto přístrojů, který k měření používá Dopplerova jevu, podobně jako policejní radary. Bohužel jsem k němu nesehnal více informací.
cena : 116,97 € = přibližně 2820 Kč



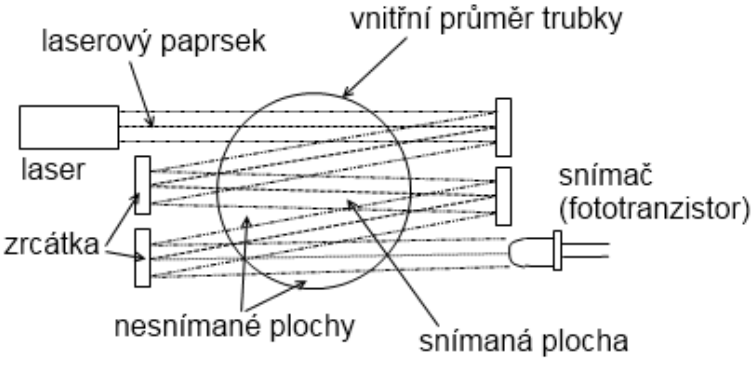
Obr.7: Chronometr s Dopplerovým jevem (převzato z [10])

5 Návrh provedení a rozměrů přístroje

Počáteční úvahy při návrhu chronometru spočívají v řešení snímání mechanického pohybu, tedy průletu kuličky senzorem, a převedení tohoto výsledku do elektronické podoby. Některé profesionální chronometry používají ke snímání průletu kulek rámy, ty jsou však konstrukčně složitější. Většina chronometrů a to především pro airsoftové aplikace však využívá optického snímání kulek pomocí laserových závor nebo infračervených závor. Menší nevýhodou je zde určité omezení ráže kulek, protože některé kuličky mohou být příliš malé, než aby je bylo spolehlivé snímat. Naopak kulky větších ráží by se nemuseli bezpečně dostat měřicí trubkou. Zatímco rámem může bezpečně proletět téměř jakákoli kulka, kterékoli ráže, kulky větších rychlostí a energií, prolétající úzkou měřicí trubkou by mohli trubku poškodit a přístroj zničit. Pokud ale použijeme airsoftové kuličky, tak se nemusíme bát, že by jejich rychlost a energie poškodila přístroj. Proto je toto řešení pro airsoft ideální.

Toto optické řešení snímání má tedy dvě možnosti: snímání laserovou závorou a snímání LED diodou. Laserové snímání je složitější po své mechanické stránce, je náročné sehnat potřebně malá zrcátka pro několikanásobné potřebné odrazy laserového paprsku a instalaci takto malých zrcátek do měřicích konzolí s takovou přesností aby laserový paprsek procházel těmi místy, kterými by měl a zároveň aby si zrcátka zachovala svoji čistotu, protože nalepená zrcátka se velice špatně čistí obzvlášť od těžko odstranitelného lepidla. Je tedy nutné, abychom při návrhu takového snímání uvážili počet odrazů paprsku, než se paprsek dostane do optického snímače, nejčastěji fototranzistoru. Při rozhodování o tom, kolik odrazů použijeme, musíme uvažovat na jednu stranu, že čím více odrazů použijeme, tím slabší a rozostřenější paprsek dostaneme na výstup a tím dostaneme menší spolehlivost při snímání. Na druhou stranu pokud použijeme malý počet odrazů, nebudeme schopni spolehlivě snímat kuličky malých ráží nebo budeme muset použít menší průměr měřicí trubky a tím zmenšíme možnost měření i větších kulek a zvětšíme tím pravděpodobnost doteku kulky stěny měřicí trubky a tím znepřesnění celého měření. Dotek kulky stěny měřicí trubky může mít různě velký vliv na samotné měření, pokud dojde k doteku kulky pod velkým úhlem dopadu, stěna pohltí menší množství energie kulky a rychlost se příliš nezmění, pokud ale kulka dopadne pod menším úhlem, může mít na výsledek velký vliv. V některých případech se dokonce může stát, že se kulička odrazí od otvoru v měřicí trubce a dostane se trubkou zpátky, proto bychom měli být opatrní při měření na tomto přístroji a neměli bychom jej používat na silnější zbraně, které by tímto odrazem mohli způsobit zranění člověku poblíž.

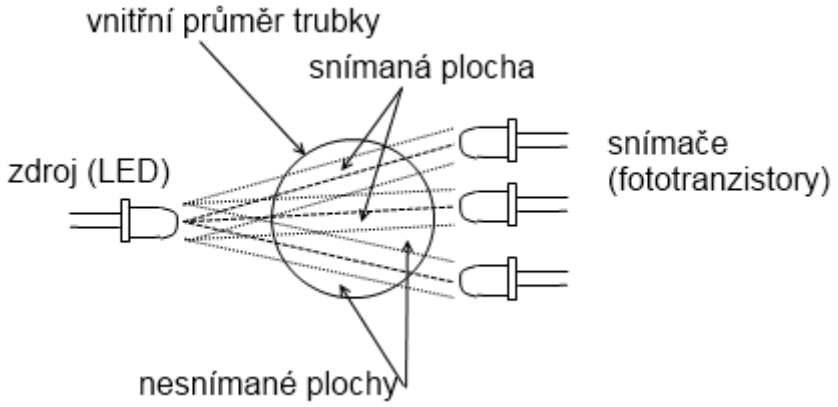
Pro ideální návrh doporučuji použít 2 - 5 odrazů, podle toho jak velké nároky na přístroj máme. Pro universálnější použití doporučuji větší počet odrazů, pro větší spolehlivost při menším rozpětí ráže je lepší použít méně odrazů.



Obr.8: Laserové snímání

Pokud chceme použít snímání LED diodou, můžeme použít jen jednoduše jednu LED diodu a jeden snímač – fototranzistor. Toto se však používá jen u přístrojů, které jsou nasazeny

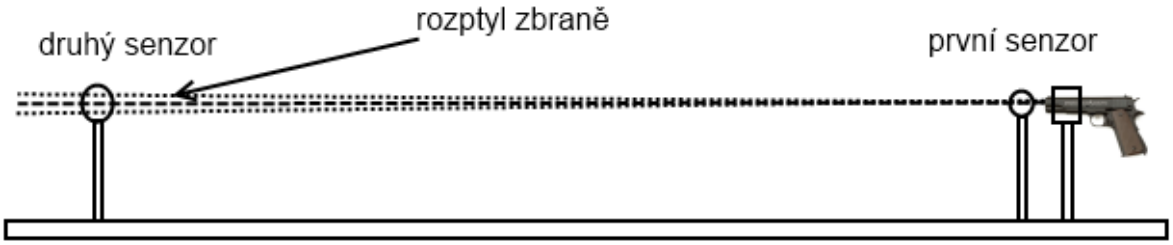
přímo a hlaveň zbraně a je tak dána přesná dráha kulky a stačí nám malý průměr otvoru, příkladem je přístroj Combro uvedený výše. V ostatních případech máme průměr trubky mnohem větší a také mnohem menší pravděpodobnost, že kulka proletí právě námi zvoleným místem. Proto umístíme na snímací stranu trubky více fototranzistorů a střela tak pravděpodobně přeruší paprsek dopadající alespoň na jeden fototranzistor. Tato aplikace má však svoje nevýhody proti aplikaci laserové závory. První nevýhodou je větší nesnímaná plocha, což je plocha, kterou může proletět střela, aniž by byla zaznamenána. Tato plocha je dána vzdáleností od procházejících paprsků v závislosti na ráži střely. Proto je možné, že některé střely menších ráží nejsou zaznamenány na rozdíl od střel větších ráží, které jsou zaznamenávány téměř vždy. Při LED snímání je tedy menší pravděpodobnost zaznamenání střely. Druhou nevýhodou je nutnost zpracovávat signál z více fototranzistorů, je tedy třeba použít za fototranzistory logický součin, abychom dále mohli detekovaný signál zpracovávat jako jediný signál. Třetí nevýhodou jsou z toho vyplývající větší náklady za použití více fototranzistorů a obvodů pro logický součin. Jedinou výhodou proti laserovému snímání je nepoužití zrcátek.



Obr.9: LED snímání

Při počátečních úvahách o konstrukci celého přístroje chceme dosáhnout toho, aby přístroj byl co nejpřesnější, nejspolehlivější, nejlevnější, nejpohodlnější, nejodolnější proti vnějším vlivům a také nejjednodušší na výrobu. Pro hráče airsoftu je jednoduché koupit si levný přístroj, který není příliš přesný ani příliš spolehlivý a snadno se zničí, nebo si naopak koupit drahý přístroj, který je spolehlivý, přesný a odolný. Proto se v této práci pokusím navrhnout přístroj spolehlivý a přesný a přesto co nejlevnější.

Pokud začneme přemýšlet nad přesností přístroje, budeme chtít, aby dráha střely, na které budeme střelu měřit, byla co nejdelší a frekvence, která bude počítat výsledný čas, aby byla co největší. Tím dosáhneme maximální přesnosti výsledku. Není však tak úplně jednoduché vzdálit snímací senzory tak daleko od sebe, protože pokud se zbraň jen málo pohne, střela neproletí druhým senzorem, pokud nemá dostatečně velkou snímací plochu. Můžeme tedy zvětšit snímací plochu, přiblížit druhý senzor nebo zajistit pevné uchopení zbraně. Nejjednodušším způsobem je tedy zřejmě pevné uchopení zbraně například do nějakého svěráku. Pokud tedy uvažujeme, že zbraň se nám již nepohne, můžeme druhý senzor umístit do takové vzdálenosti, aby snímací plocha senzoru byla schopná zachytit střelu jen s počítaným rozptylem samotné zbraně.



Obr.10: Idealizovaný způsob měření

Pokud potřebujeme natolik přesný přístroj, můžeme vycházet z této teorie, rozvíjet ji, a rychlost střely tak spočítat velice přesně. Konstrukce, která by byla takhle velice rozměrná, a nutnost přesného upínání zbraně do nějakého svěráku však dělá z takového přístroje velice nepohodlnou, nepraktickou a neskladnou věc, v praxi příliš nepoužitelnou. Proto se pokusíme navrhnout přístroj jiným způsobem, kompromisem mezi přesností a pohodlností použití. Pokud tedy nebudeme zbraň upínat do svěráku, musíme počítat s tím, že střelec držící zbraň se musí trefit do snímací plochy druhého senzoru. Přesto, že navrhneme senzory tak, aby bylo možné se do nich bez problémů trefit, může se stát, že střelec vystřelí mimo snímací plochu druhého senzoru. Aby nedošlo k poškození přístroje, jiných věcí nebo ublížení na zdraví osobám, musíme střelu od prvního senzoru ke druhému dostat trubkou i za cenu toho, že střela může zavadit o stěnu trubky a ovlivnit výsledek měření. Častým dotykům střely o stěnu trubky zabráníme zvětšením průměru trubky nebo zmenšením délky trubky. Jak jsem se však již zmínil, zmenšením délky trubky dojde ke snížení přesnosti výsledku měření. Zvětšením průměru trubky zvětšíme snímací plochu senzoru, čímž zvětšujeme konstrukční nároky na snímací senzor (viz výše). Kompromisem mezi těmito faktory ovlivňujícími návrh přístroje určíme rozměry:

Pro větší spolehlivost a jednodušší návrh obvodu, jsem pro řešení mého návrhu určil laserové snímání jako vhodnější metodu snímání. Především z důvodu větší spolehlivosti pokrytí snímané plochy pro střely nejběžnějších rozměrů použijeme 4 odrazová zrcátka a máme tak k dispozici 5 paprsků laseru, viz obr.8 . Protože chceme co nejbezpečněji pokrýt střely ráže 4,5 – 8 mm, určíme vnitřní průměr trubky jako minimálně dvojnásobek průměru největšího projektilu.

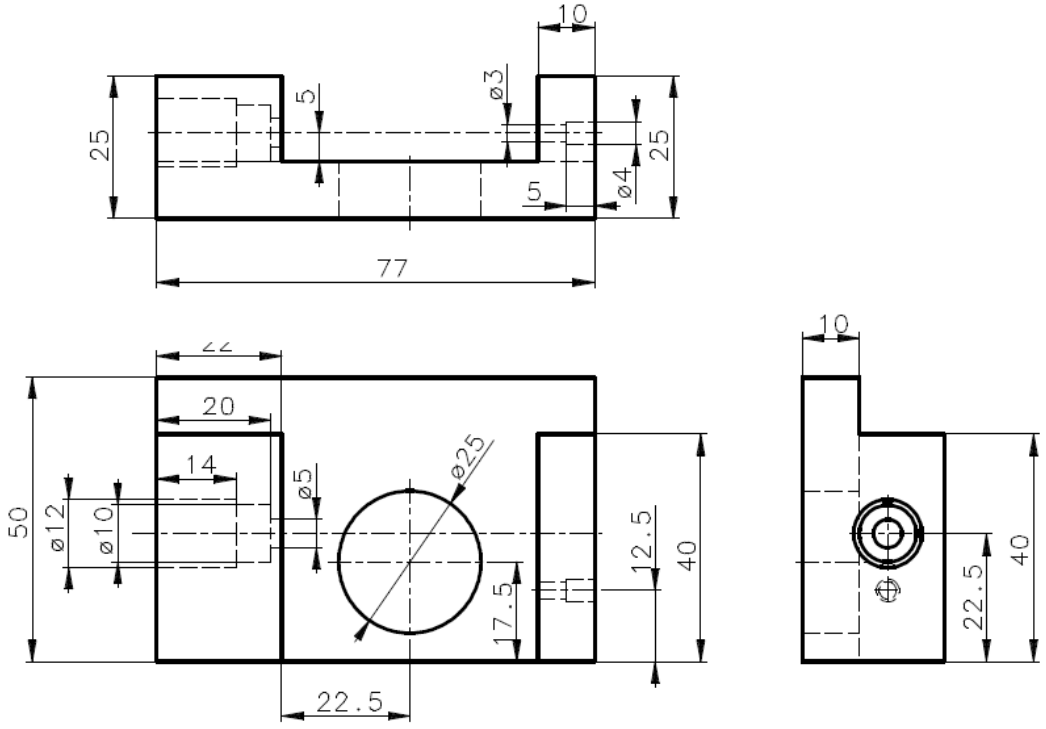
$$2 \cdot 8\ mm = 16\ mm \cong 20\ mm \qquad (4)$$

Abychom uspořádali lasery v senzoru tak aby zachytily na maximální ploše i střely s průměrem 4,5 mm, vezmeme tři vodorovné lasery a rozdělíme jimi průřez trubky na 4 stejně vysoké části, tedy vysoké 5 mm.

$$20 : 4 = 5\ mm \qquad (5)$$

Spojením těchto tří laserů zbývajícími dvěma lasery vyplníme snímaný prostor ve dvou větších částech rozděleného průřezu trubky. Nesnímaná místa tak vzniknou tam, kde jsou paprsky odraženého laseru od sebe vzdáleny jen 0,5 mm, což je rozdíl mezi vzdáleností vodorovných paprsků laseru svítících jedním směrem a minimálním průměrem počítané střely. Další nesnímané plochy vzniknou tam, kde je vnitřní strana průřezu trubky vzdálena od laseru na více než 4,5 mm, což je 0,5 mm široký pásek na okraji průřezu trubky. Tuto nesnímanou plochu můžeme eliminovat pouze posunutím laseru o 0,5 mm blíže k okraji, tím bychom však zvětšili nesnímanou plochu mezi lasery, proto tuto nesnímanou plochu zanedbáme pro její velikost a umístění. Nesnímaná plocha mezi lasery se však odstranit dá. Oddálením zrcátek od stěn trubky dosáhneme menšího úhlu mezi odraženými lasery a tím lepšího proložení snímaného průřezu. Nesnímané plochy se tak odsunou mimo vnitřní průřez trubky. Nutno dodat, že oddálení zrcátek způsobí větší nároky na přesnost konstrukce, proto není vhodné instalovat odrazová zrcátka do příliš velké vzdálenosti.

Navrhnuté prvky laserového snímání je třeba upevnit na svá místa. Nejde však jen o pevné umístění zrcátek, laseru a fototranzistoru, fototranzistor by měl být umístěn tak aby do něj směřovaly paprsky jen z přímého směru a snímal tak pouze laser z protějšího zrcátka a nebyl ovlivňován světlem z okolního prostředí. Výsledkem je konzole nasaditelná na trubku zobrazená na obrázku 11.



Obr.11: Konzole

Konzole se skládá z části, která celá obepíná trubku a na kterou jsou připevněny dvě části s prvky na jednu a druhou stranu. Konzole drží na trubce pevně díky stahovacímu šroubu umístěnému ve vrchní části konzole. Stahovacím šroubem je připevněný také laser v levé části konzole. Fototranzistor je však příliš malý a je připevněn šroubkem tlačícím přímo na něj.
Zrcátka musí odrážet paprsky vzdálené od sebe 5 mm, což znamená, že zrcátka musí být vysoké maximálně těchto 5 mm, menší skleněná zrcátka jsou téměř také nesehnatelná, protože řezání skla na tak malé rozměry je náročné. Z pětimilimetrového skleněného pásku je poté ještě náročnější řezat kousky 5 mm, abychom dostali čtverce, proto jsem zvolil velikost 10 mm, což bylo jednodušší na řezání skla i na lepení na konzolu (obrázek 11).

Při návrhu trubky jsem uvažoval nad možností měření zrychlení střely, proto jsem nepoužil jen dva snímače jako všichni výrobci ale rovnou tři, což neumožňuje jen měření zrychlení ale i zvětšuje spolehlivost sejmutí střely alespoň dvěma snímači. Aby se dalo bez problémů trefit do druhého i třetího senzoru aniž by se střela dotkla stěny trubky, určil jsem vzdálenost mezi jednotlivými senzory na 10 cm. Díky této vzdálenosti půjde změřit výsledné veličiny s dostatečnou přesností.

6 Návrh elektronické části přístroje

Mikroprocesor

Při výběru mikroprocesoru záleží hodně na pracovní frekvenci mikroprocesoru. Frekvence mikroprocesoru totiž počítá čas, za který urazí střela dráhu mezi dvěma snímači. Dalším důležitým faktorem je nutnost vybavení mikroprocesoru čítačem, který tento čas zaznamená. Mikroprocesor potřebuje dále alespoň dva vstupní piny a minimálně tři výstupní piny pro zobrazení výsledku, pokud počítáme se zapojením zobrazovacího LCD panelu, bude na to potřebovat minimálně 7 výstupních pinů. Pokud však chceme mít mikroprocesor připravený na plnou výbavu přístroje, bude potřebovat pinů mnohem více.

Abychom věděli, jakou frekvenci budeme potřebovat, pokusíme se spočítat některé frekvence pro potřebné přesnosti. Dané přesnosti budeme počítat pro maximální předpokládanou měřenou rychlost v_1 = 200 m/s, nejmenší předpokládanou měřenou rychlost v_3 = 30 m/s a střední rychlost v nejpoužívanějším pásmu měření v_2 = 100 m/s.

Použité vzorce:

$$t_c = \frac{1}{f} \quad (6)$$

t_c ..... délka jednoho cyklu [s]

f ..... frekvence [Hz]

$$t_s = N \cdot t_c \quad (7)$$

t_s ..... celkový čas, za který uletí střela dráhu mezi dvěma snímači [s]

N ..... počet cyklů [-]

$$v = \frac{d}{t_s} = \frac{f \cdot d}{N} \quad (8)$$

v ..... rychlost střely [m/s]

d ..... vzájemná vzdálenost snímačů [m]

Pro přesnost na celá čísla:

v_1 = 200 m/s v_4 = 199 m/s

v_2 = 100 m/s v_5 = 99 m/s

v_3 = 30 m/s v_6 = 29 m/s

d = 0,1 m

časy jednotlivých základních rychlostí:

$$t_{s1} = \frac{d}{v_1} = \frac{0{,}1}{200} = 0{,}0005 = 500\mu s \quad (9)$$

$$t_{s2} = \frac{d}{v_2} = \frac{0{,}1}{100} = 0{,}001 = 1ms \quad (10)$$

$$t_{s3} = \frac{d}{v_3} = \frac{0{,}1}{30} = 0{,}0033 = 3{,}33333ms \quad (11)$$

časy rychlostí snížených o 1:

$$t_{s4} = \frac{d}{v_4} = \frac{0{,}1}{199} = 0{,}00050251 = 502{,}51\mu s \quad (12)$$

$$t_{s5} = \frac{d}{v_5} = \frac{0{,}1}{99} = 0{,}0010101 = 1{,}0101ms \quad (13)$$

$$t_{s6} = \frac{d}{v_6} = \frac{0{,}1}{29} = 0{,}00344827 = 3{,}44827ms \quad (14)$$

rozdíly vypočtených časů:

$$t_{c1} = t_{s4} - t_{s1} = 502{,}51 - 500 = 2{,}51\mu s \quad (15)$$

$$t_{c2} = t_{s5} - t_{s2} = 1010{,}1 - 1000 = 10{,}1\mu s \quad (16)$$

$$t_{c3} = t_{s6} - t_{s3} = 3448{,}27 - 3333{,}33 = 114{,}94\mu s \quad (17)$$

frekvence z rozdílů časů:

$$f_1 = \frac{1}{t_{c1}} = \frac{1}{2{,}51 \cdot 10^{-6}} = 398KHz \quad (18)$$

$$f_2 = \frac{1}{t_{c2}} = \frac{1}{10{,}1 \cdot 10^{-6}} = 99KHz \quad (19)$$

$$f_3 = \frac{1}{t_{c3}} = \frac{1}{114{,}94 \cdot 10^{-6}} = 8{,}7KHz \quad (20)$$

Pro přesnost na jedno desetinné místo:
v_{41} = 199,9 m/s
v_{51} = 99,9 m/s
v_{61} = 29,9 m/s

časy rychlostí snížených o 0,1:

$$t_{s41} = \frac{d}{v_{41}} = \frac{0{,}1}{199{,}9} = 0{,}00050025 = 500{,}25\mu s \quad (21)$$

$$t_{s51} = \frac{d}{v_{51}} = \frac{0{,}1}{99{,}9} = 0{,}001001001 = 1{,}001001ms \quad (22)$$

$$t_{s61} = \frac{d}{v_{61}} = \frac{0{,}1}{29{,}9} = 0{,}003344481 = 3{,}344481ms \quad (23)$$

rozdíly vypočtených časů:

$$t_{c11} = t_{s41} - t_{s1} = 500{,}25 - 500 = 0{,}25\mu s \quad (24)$$

$$t_{c21} = t_{s51} - t_{s2} = 1001{,}001 - 1000 = 1{,}001\mu s \quad (25)$$

$$t_{c31} = t_{s61} - t_{s3} = 3344{,}481 - 3333{,}333 = 11{,}148\mu s \quad (26)$$

frekvence z rozdílů časů:

$$f_{11} = \frac{1}{t_{c11}} = \frac{1}{0{,}25 \cdot 10^{-6}} = 4MHz \quad (27)$$

$$f_{21} = \frac{1}{t_{c21}} = \frac{1}{1{,}001 \cdot 10^{-6}} = 999KHz \quad (28)$$

$$f_{31} = \frac{1}{t_{c31}} = \frac{1}{11{,}148 \cdot 10^{-6}} = 89{,}7KHz \quad (29)$$

Pro přesnost na dvě desetinná místa:
v_{42} = 199,99 m/s
v_{52} = 99,99 m/s
v_{62} = 29,99 m/s

časy rychlostí snížených o 0,01:

$$t_{s42} = \frac{d}{v_{42}} = \frac{0{,}1}{199{,}99} = 0{,}000500025 = 500{,}025\mu s \quad (30)$$

$$t_{s52} = \frac{d}{v_{52}} = \frac{0{,}1}{99{,}99} = 0{,}00100010001 = 1{,}00010001ms \quad (31)$$

$$t_{s62} = \frac{d}{v_{62}} = \frac{0{,}1}{29{,}99} = 0{,}00333444481 = 3{,}33444481ms \quad (32)$$

rozdíly vypočtených časů:

$$t_{c12} = t_{s42} - t_{s1} = 500{,}025 - 500 = 0{,}025\mu s \quad (33)$$

$$t_{c22} = t_{s52} - t_{s2} = 1000{,}10001 - 1000 = 0{,}10001\mu s \quad (34)$$

$$t_{c32} = t_{s62} - t_{s3} = 3334{,}444 - 3333{,}333 = 1{,}111\mu s \quad (35)$$

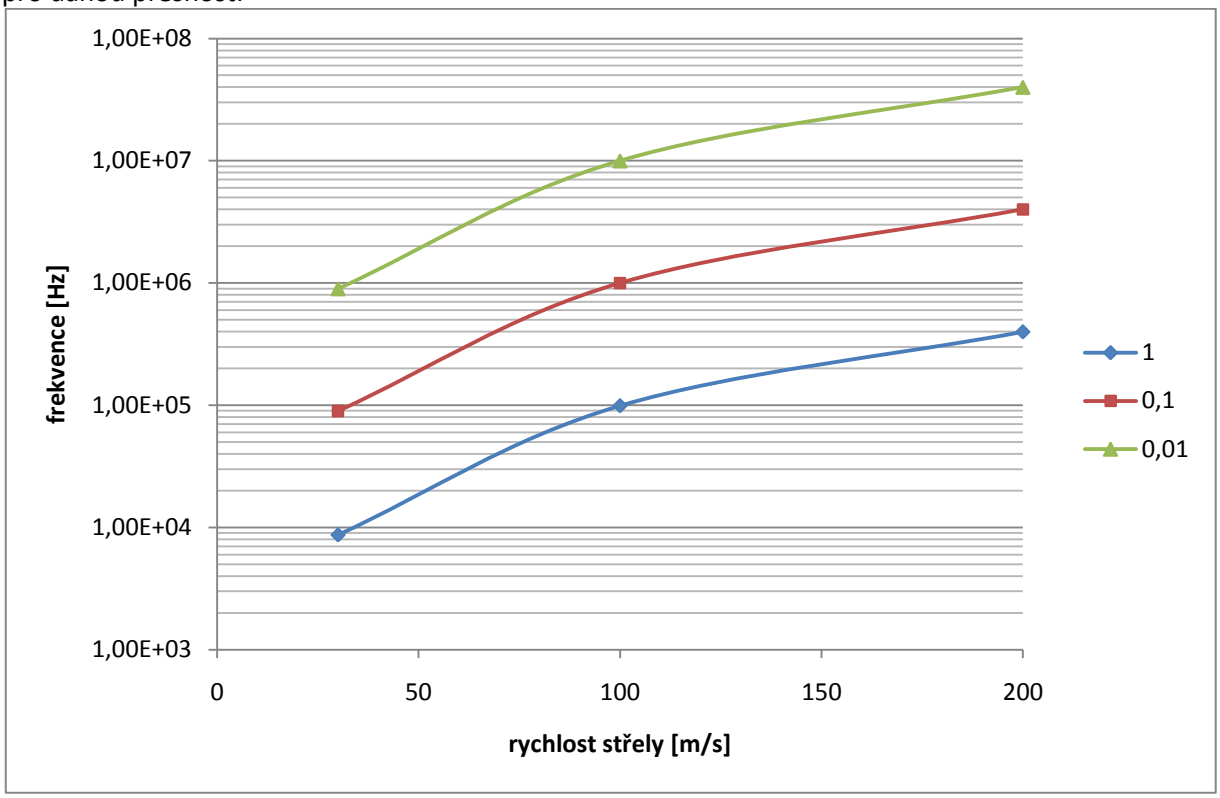
frekvence z rozdílů časů:

$$f_{12} = \frac{1}{t_{c12}} = \frac{1}{0{,}025 \cdot 10^{-6}} = 40MHz \quad (36)$$

$$f_{22} = \frac{1}{t_{c22}} = \frac{1}{0{,}10001 \cdot 10^{-6}} = 10MHz \quad (37)$$

$$f_{32} = \frac{1}{t_{c32}} = \frac{1}{1{,}111 \cdot 10^{-6}} = 899{,}7KHz \quad (38)$$

Z vypočítaných hodnot je možné sestrojit graf potřebné frekvence pro měření určité rychlosti pro danou přesnost:



Obr.12: Graf potřebné frekvence pro měření určité rychlosti pro danou přesnost

Z potřebných frekvencí pro určité rychlosti daných přesností lze stanovit, kolikabitové časovače bychom potřebovali, abychom mohli tyto rychlosti v dané přesnosti změřit. Není, však úplně jednoznačné určit kolik bitů tento časovač potřebuje. Pokud potřebujeme změřit vysokou rychlost s velkou přesností, budeme potřebovat využít vysoké frekvence. Ta však sebou přináší velké nároky na časovač. Spočítáme-li, kolik potřebujeme minimálně bitů a tento počet bitů použijeme, zjistíme, že tento počet bitů nám nestačí pro měření nižších rychlostí a můžeme tím měřit jen rychlosti od určité rychlosti výše. Řešit se to dá zvýšením počtu bitů, každý přidaný bit navíc, sníží minimální hodnotu měřitelné rychlosti na polovinu. Vyplývá to z rovnice (39). Následující tabulka nám ukáže, jaké jsou hodnoty minimálních měřitelných rychlostí při použití minimálního počtu bitů pro rychlosti dané přesnosti při použití vypočtených frekvencí.

přesnost	v [m/s]	f [Hz]	N [-]	a [b]	b [m/s]	c [b]
1	30	8700	30	5	27	5
	100	99000	100	7	77	9
	200	398000	200	8	156	11
0,1	30	89700	300	9	17,5	9
	100	999000	1000	10	97,6	12
	200	4000000	2000	11	195,3	14
0,01	30	899700	3000	12	21,97	12
	100	10000000	10000	14	61,04	16
	200	40000000	20000	15	122,07	18

Tab.1: Tabulka minimálního počtu bitů v časovači, pro dosažení dané přesnosti

a ..... počet bitů [b]
b ..... minimální měřitelná rychlost při minimálním počtu bitů [m/s]
c ..... doporučený počet bitů [b]

Doporučený počet bitů je počet bitů potřebných pro snížení minimální měřitelné rychlosti pod 30 m/s. Minimální měřitelnou rychlost při minimálním počtu bitů spočítáme podle vzorce (39).

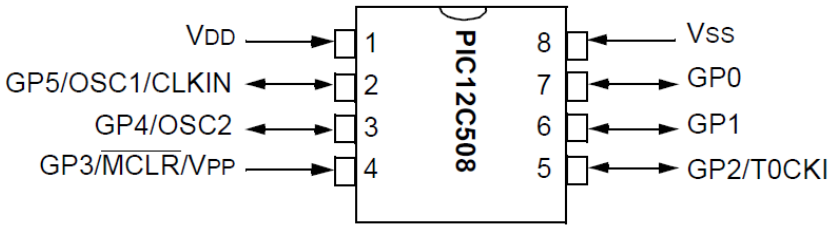
$$b = \frac{f \cdot d}{N_a} \tag{39}$$

N_a ..... maximální počet cyklů při minimálním počtu bitů = 2^a

$$b_3 = \frac{f_3 \cdot d}{N_{a3}} = \frac{8700 \cdot 0{,}1}{32} = 27\ m/s \tag{40}$$
$$b_2 = \frac{f_2 \cdot d}{N_{a2}} = \frac{99000 \cdot 0{,}1}{128} = 77\ m/s \tag{41}$$
$$b_1 = \frac{f_1 \cdot d}{N_{a1}} = \frac{398000 \cdot 0{,}1}{256} = 156\ m/s \tag{42}$$
$$b_{31} = \frac{f_{31} \cdot d}{N_{a31}} = \frac{89700 \cdot 0{,}1}{512} = 17{,}5\ m/s \tag{43}$$
$$b_{21} = \frac{f_{21} \cdot d}{N_{a21}} = \frac{999000 \cdot 0{,}1}{1024} = 97{,}6\ m/s \tag{44}$$
$$b_{11} = \frac{f_{11} \cdot d}{N_{a11}} = \frac{4000000 \cdot 0{,}1}{2048} = 195{,}3\ m/s \tag{45}$$
$$b_{32} = \frac{f_{32} \cdot d}{N_{a32}} = \frac{899700 \cdot 0{,}1}{4096} = 21{,}97\ m/s \tag{46}$$
$$b_{22} = \frac{f_{22} \cdot d}{N_{a22}} = \frac{10000000 \cdot 0{,}1}{16384} = 61{,}04\ m/s \tag{47}$$
$$b_{12} = \frac{f_{12} \cdot d}{N_{a12}} = \frac{40000000 \cdot 0{,}1}{32768} = 122{,}07\ m/s \tag{48}$$

Nyní když známe nároky na potřebnou přesnost a měřicí rozsah mikroprocesorů, můžeme se pokusit některé konkrétní mikroprocesory zhodnotit a posoudit, jak přesně jsou schopny změřit a spočítat naši měřenou rychlost. Začneme od nejjednodušších a pokusíme se určit jejich možnosti z jejich parametrů, které jsou pro nás nejdůležitější.

PIC12C508



Obr.13: Mikroprocesor PIC12C508 (převzato z [11])

Parametry:
frekvence: 4MHz interní oscilátor
časovač: jeden 8mi bitový
počet vstup/výstupních pinů: 6
výrobce: Mikrochip

Počet cyklů potřebných ke změření v_1 = 200 m/s při frekvenci 4MHz:

$$N = \frac{f \cdot d}{v_1} = \frac{4000000 \cdot 0{,}1}{200} = 2000 \tag{49}$$

Jak vidíme je počet cyklů větší než je schopen pojmout náš 8mi bitový časovač (2^8 = 256), musíme tedy vypočítat maximální frekvenci, jakou bychom museli nastavit, abychom

mohli měřit potřebnou rychlost. Pro vypočtení této frekvence určíme dolní měřitelnou hodnotu rychlosti na 50 m/s, abychom příliš nezhoršili přesnost přístroje, která už tak nebude příliš velká.

$$f_{max} = \frac{N_{max} \cdot v_{min}}{d} = \frac{256 \cdot 50}{0{,}1} = 128\ KHz \quad (50)$$

Touto frekvencí upravíme předchozí výpočet:

$$N = \frac{f \cdot d}{v_1} = \frac{128000 \cdot 0{,}1}{200} = 64 \quad (51)$$

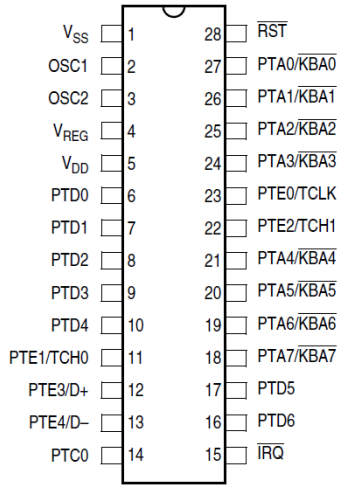
$$v_{N+1} = \frac{f \cdot d}{N+1} = \frac{128000 \cdot 0{,}1}{65} \doteq 196{,}92\ m/s \quad (52)$$

Odchylku vypočítáme jako rozdíl dvou změřitelných hodnot dělený dvěma:

$$\Delta v = \frac{v_1 - v_{N+1}}{2} = \frac{200 - 196{,}92}{2} = 1{,}54\ m/s \quad (53)$$

Vzhledem k tomu, že odchylka je větší než 1,5 m/s tak by se měřicí přístroj s tímto mikroprocesorem dal použít jen jako orientační. Protože má také malý počet vstup/výstupních pinů, nemůžeme si dovolit zobrazovat naměřenou rychlost LCD panelem ale musíme si vystačit poněkud nešikovně se třemi ledkami, které postupně budou zobrazovat stovky, desítky a jednotky naměřené rychlosti. To nám zabere tři piny. Protože nemůžeme jednoduše zobrazit více hodnot, budou nám stačit dva vstupní piny od snímačů. Zbývající pin je možné využít na zjednodušení ovládání a použít nějaké tlačítko nebo jiný ovládací prvek. Toto řešení je sice jednoduché ale nepraktické a málo přesné.

M68HC08



Parametry:
frekvence: 3MHz interní oscilátor
časovač: jeden 16ti bitový
počet vstup/výstupních pinů: 13
výrobce: freescale

Obr.14: Mikroprocesor M68HC08 (převzato z [12])

Počet cyklů potřebných ke změření v_1 = 200 m/s při frekvenci 3MHz:

$$N = \frac{f \cdot d}{v_1} = \frac{3000000 \cdot 0{,}1}{200} = 1500 \quad (54)$$

V tomto případě je potřebný počet cyklů menší, než je kapacita časovače, protože máme k dispozici dostatečně velký (16b = 65536)časovač.

$$v_{N+1} = \frac{f \cdot d}{N+1} = \frac{3000000 \cdot 0{,}1}{1501} \doteq 199{,}87\ m/s \quad (55)$$

Odchylku vypočítáme jako rozdíl dvou změřitelných hodnot dělený dvěma:

$$\Delta v = \frac{v_1 - v_{N+1}}{2} = \frac{200 - 199{,}87}{2} = 0{,}065\ m/s \quad (56)$$

A minimální změřitelnou hodnotu rychlosti:

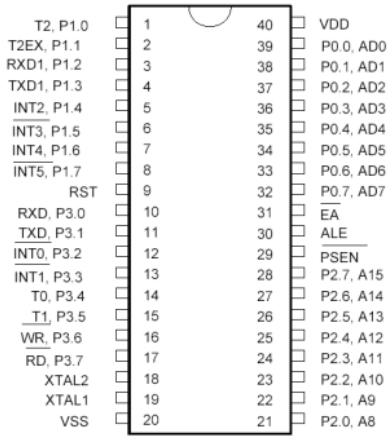
$$v_{min} = \frac{f \cdot d}{N_{max}} = \frac{3000000 \cdot 0{,}1}{65536} = 4{,}58\ m/s \quad (57)$$

U použití tohoto mikroprocesoru vidíme, jak je důležité využití 16ti bitového časovače. Odchylka se dostala pod hranici 0,1 m/s a proto můžeme říci, že přístroj může měřit s přesností

na jedno desetinné místo pro všechny rychlosti do 200 m/s. Žádný problém není ani s minimální měřitelnou rychlostí, která se dostala dokonce pod 5 m/s.

Protože máme k dispozici 13 vstup/výstupních pinů, můžeme si dovolit použít LCD panel, který nám vezme 7 pinů. Protože se zobrazováním není žádný problém, použijeme všechny tři snímače, což nám zabere 3 piny. Poslední 3 piny by bylo vhodné opět využít pro tlačítka nebo jiné ovládací prvky.

8051



Parametry:
frekvence: 3,5 - 12MHz externí oscilátor
časovač: dva 16ti bitové
počet vstup/výstupních pinů: 32
výrobce: intel

Obr.15: Mikroprocesor 8051 (převzato z [13])

Počet cyklů potřebných ke změření v_1 = 200 m/s při frekvenci 12MHz:

$$N = \frac{f \cdot d}{v_1} = \frac{12000000 \cdot 0{,}1}{200} = 6000 \quad (58)$$

Přesto, že máme k dispozici dva 16ti bitové časovače, využijeme jen jeden, který nám stačí.

$$v_{N+1} = \frac{f \cdot d}{N+1} = \frac{12000000 \cdot 0{,}1}{6001} \doteq 199{,}97\ m/s \quad (59)$$

Odchylku opět vypočítáme jako rozdíl dvou změřitelných hodnot dělený dvěma:

$$\Delta v = \frac{v_1 - v_{N+1}}{2} = \frac{200 - 199{,}97}{2} = 0{,}015\ m/s \quad (60)$$

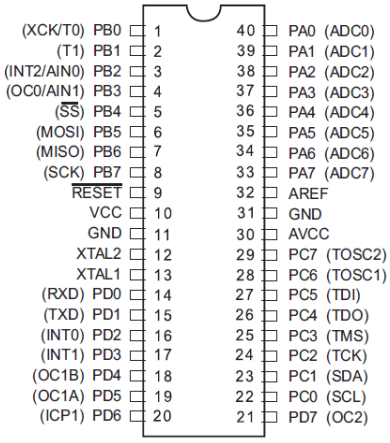
A minimální změřitelnou hodnotu rychlosti:

$$v_{min} = \frac{f \cdot d}{N_{max}} = \frac{12000000 \cdot 0{,}1}{65536} = 18{,}31\ m/s \quad (61)$$

Z vypočítaných údajů o možnostech tohoto mikroprocesoru můžeme usoudit, že odchylka se velice přiblížila hranici 0,01, takže můžeme říci, že v hlavních pásmech měření (kolem 100 m/s) budeme moci měřit rychlost s přesností na dvě desetinná místa, nebude to však možné v celém rozsahu rychlostí do 200 m/s. Minimální měřitelná rychlost sice díky větší frekvenci vzrostla na 18,31 m/s ale stále se drží na velice dobré hodnotě.

Počet vstup/výstupních pinů je 32, což znamená nejen opět možnost připojení LCD panelu, všech tří snímačů pro měření zrychlení ale i velkého množství tlačítek pro pohodlné ovládání. Kromě toho nám pořád zůstane několik pinů pro připojení nějaké periférie. Jedinou nevýhodou tohoto mikroprocesoru je absence interního oscilátoru, proto je nutné připojit krystal o maximální hodnotě 12 MHz.

ATmega16



Parametry:
frekvence: 1 – 8 MHz interní oscilátor,
16 MHz externí oscilátor
časovač: dva 8mi bitové, jeden 16ti bitový
počet vstup/výstupních pinů: 32
výrobce: atmel

Obr.16: Mikroprocesor ATmega16 (převzato z [14])

Pokud nám stačí použít interní oscilátor, můžeme jej nastavit až na hodnotu 8 MHz, poprvé je však nastaven na 1 MHz. Počet cyklů potřebných ke změření v_1 = 200 m/s při frekvenci 8 MHz:

$$N = \frac{f \cdot d}{v_1} = \frac{8000000 \cdot 0{,}1}{200} = 4000 \quad (62)$$

Opět použijeme 16ti bitový časovač a dva 8mi bitové necháme nevyužité.

$$v_{N+1} = \frac{f \cdot d}{N+1} = \frac{8000000 \cdot 0{,}1}{4001} \doteq 199{,}95\ m/s \quad (63)$$

Odchylku opět vypočítáme jako rozdíl dvou změřitelných hodnot dělený dvěma:

$$\Delta v = \frac{v_1 - v_{N+1}}{2} = \frac{200 - 199{,}95}{2} = 0{,}025\ m/s \quad (64)$$

A minimální změřitelnou hodnotu rychlosti:

$$v_{min} = \frac{f \cdot d}{N_{max}} = \frac{8000000 \cdot 0{,}1}{65536} = 12{,}21\ m/s \quad (65)$$

Je vidět, že pokud použijeme menší frekvenci na rozdíl od minulého mikroprocesoru, zhorší se přesnost. Abychom věděli, s jakou přesností můžeme u jakých rychlostí počítat, spočítáme si, do jaké rychlosti můžeme změřit rychlost střely s odchylkou 0,01 m/s.

$$\Delta v = 0{,}01\ m/s \quad (66)$$

$$\frac{v_N - v_{N+1}}{2} = 0{,}01 \quad (67)$$

$$\frac{f \cdot d}{N} - \frac{f \cdot d}{N+1} = 0{,}02 \quad (68)$$

$$f \cdot d(N+1) - f \cdot d(N) = 0{,}02 \cdot N(N+1) \quad (69)$$

$$f \cdot d(N+1-N) = 0{,}02(N^2 + N) \quad (70)$$

$$8\,000\,000 \cdot 0{,}1 = 0{,}02(N^2 + N) \quad (71)$$

$$N^2 + N - 40\,000\,000 = 0 \quad (72)$$

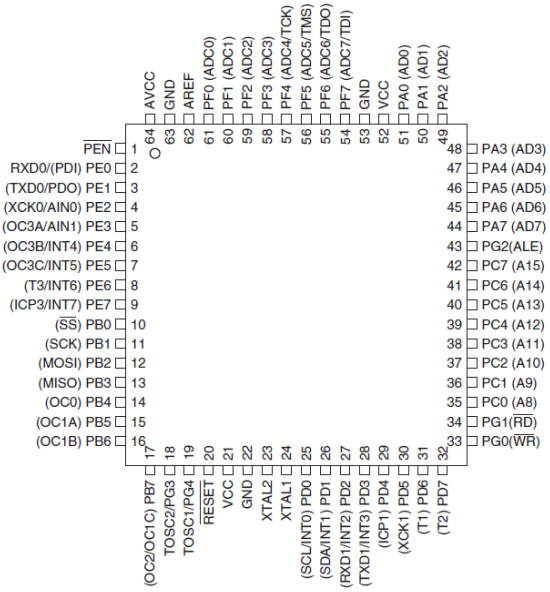
$$D = 1^2 - 4 \cdot 1 \cdot (-40\,000\,000) = 160\,000\,001 \quad (73)$$

$$N = \frac{-b \pm \sqrt{D}}{2a} = \frac{-1 + \sqrt{160\,000\,001}}{2} = 6324 \quad (74)$$

$$v_N = \frac{f \cdot d}{N} = \frac{8\,000\,000 \cdot 0{,}1}{6324} \doteq 126{,}50\ m/s \quad (75)$$

Vidíme, že rychlost, při které dosáhneme odchylky 0,01 m/s má hodnotu 126,5 m/s. Rychlosti menší než je tato rychlost můžeme považovat za hodnoty s přesností na dvě desetinná místa. Protože hlavní měřené pásmo je přibližně od 90 m/s do přibližně 130 m/s můžeme říct, že téměř v celém hlavním měřeném pásmu můžou naměřené hodnoty rychlosti dosáhnout přesnosti na dvě desetinná místa.

ATmega128



Parametry:
frekvence: 1 – 8 MHz interní osc.,
16 MHz externí osc.
časovač: dva 8mi bitové, dva 16ti bitové
počet vstup/výstupních pinů: 53
výrobce: atmel

Obr.17: Mikroprocesor ATmega128 (převzato z [15])

Podobně jako u mikroprocesoru ATmega16 bychom počítali pro maximální kmitočet interního oscilátoru 8 MHz stejné výpočty parametrů, proto budeme uvažovat maximální kmitočet externího oscilátoru 16 MHz, což platí i pro mikroprocesor ATmega16.

$$N = \frac{f \cdot d}{v_1} = \frac{16\,000\,000 \cdot 0{,}1}{200} = 8\,000 \tag{76}$$

Při použití 16ti bitového časovače.

$$v_{N+1} = \frac{f \cdot d}{N+1} = \frac{16\,000\,000 \cdot 0{,}1}{8\,001} \doteq 199{,}98\ m/s \tag{77}$$

Odchylku opět vypočítáme jako rozdíl dvou změřitelných hodnot dělený dvěma:

$$\Delta v = \frac{v_1 - v_{N+1}}{2} = \frac{200 - 199{,}98}{2} = 0{,}01\ m/s \tag{78}$$

A minimální změřitelnou hodnotu rychlosti:

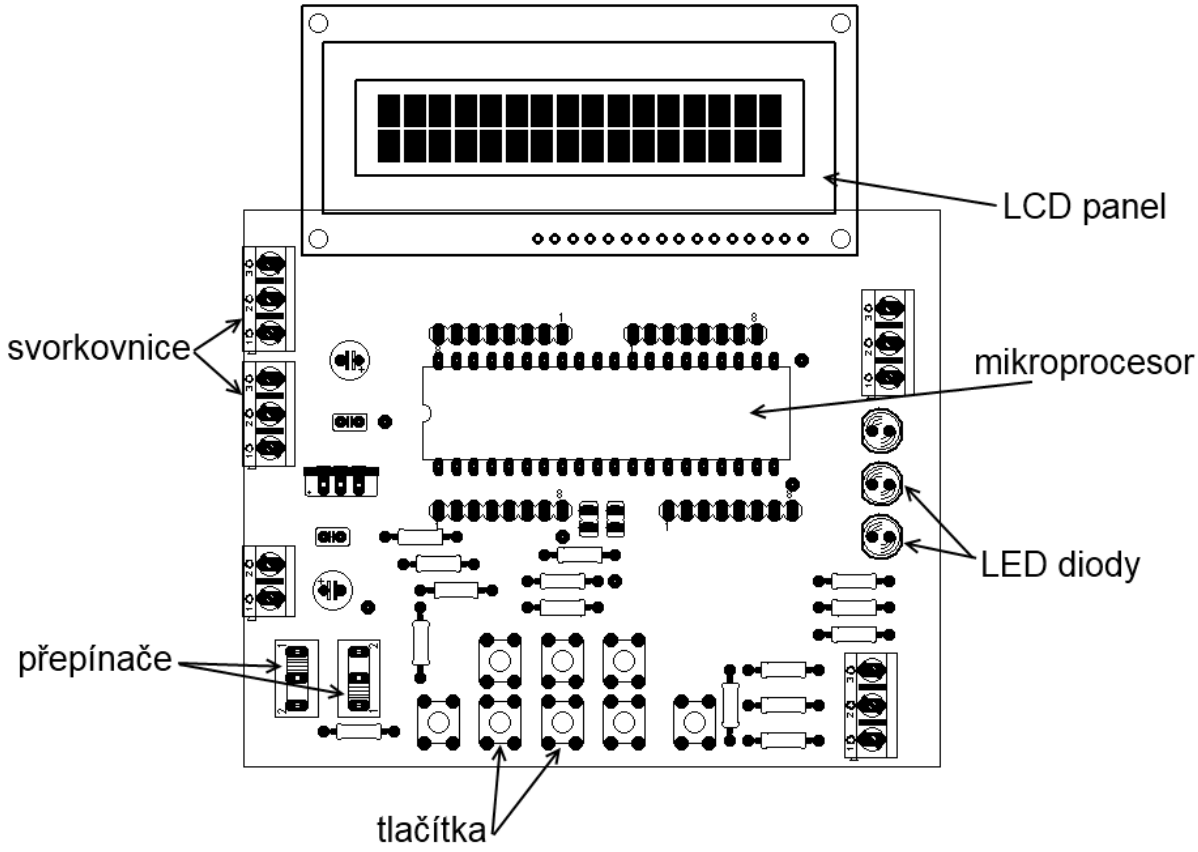
$$v_{min} = \frac{f \cdot d}{N_{max}} = \frac{16\,000\,000 \cdot 0{,}1}{65536} = 24{,}42\ m/s \tag{79}$$

Z těchto údajů usoudíme, že při použití kmitočtu 16 MHz a 16ti bitového časovače dosáhneme i při měření rychlosti střely 200 m/s přesnosti s odchylkou 0,01 m/s a můžeme tedy říci, že přesnosti na dvě desetinná místa dosahujeme v celém potřebném měřicím rozsahu. Minimální změřitelná hodnota rychlosti je 24,42 m/s, což je pořád méně než 30 m/s, které jsme určili jako nejmenší předpokládanou měřenou rychlost v_3.

U mikroprocesoru ATmega128 máme k dispozici 53 vstup/výstupních pinů, což nám dává prostor nejen pro připojení všech již dříve uvedených periférií pro dostatečně pohodlné používání (LCD panel, tři snímače, dostatek tlačítek) jako u dvou předchozích mikroprocesorů, ale i dostatek prostoru pro několik dalších periférií, které si uvedeme později.

Návrh desky plošných spojů

Pro návrh elektronické části měřicího přístroje jsem vybral mikroprocesor ATmega16, který má dostatečné parametry k tomu, aby mohl s dostatečnou přesností měřit nejen úsťovou rychlost zbraně ale i další potřebné parametry. ATmega16 má 32 vstup/výstupních pinů uspořádaných do 4 portů. Desku plošných spojů budeme tedy přizpůsobovat těmto možnostem. Kromě mikroprocesoru máme na desce LCD panel (port A), 8 tlačítek (port B), tři vstupy od snímačů (port D), tři LED diody (port D) a jeden přepínač (port D) připojený na mikroprocesor. Z těch částí, které nejsou připojené na vstup/výstupní porty mikroprocesoru jsou to stabilizátor na 5V, přepínač na vypínání celého zařízení a svorkovnice pro připojení napájení a snímačů. Na mikroprocesoru nám tak zůstalo 11 volných vstup/výstupních pinů, které můžeme podle potřeby využít pro další periférie. Abychom mohli tyto další periférie připojovat, a pro potřeby měření, jsou všechny porty mikroprocesoru vyvedeny kolíky.



Obr.18: Osazení součástek na desce plošných spojů

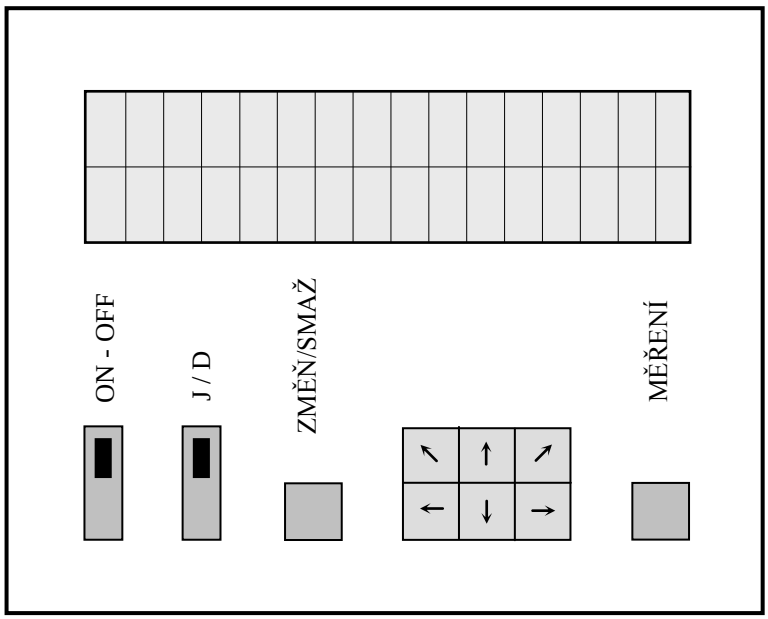
Na desce plošných spojů je 5 svorkovnic, jedna svorkovnice AK 500/2 slouží k napájení zařízení, dvě svorkovnice AK 500/3 slouží k napájení laserů a dvě svorkovnice AK 500/3 slouží k připojení fototranzistoru.

Tři LED diody mají sloužit především jako doplňková funkce přístroje a to indikace průletu snímači. Podle rozsvícených diod můžeme poznat, které paprsky snímačů byly přerušeny a kontrolovat tak správnost jejich funkčnosti. Tyto LED diody však budou využity i jinak a to jako zobrazovací jednotka a to v případě absence LCD panelu. LED diody můžeme v rámci přehlednosti použít jen na zobrazení rychlosti a to s přesností maximálně na celé jednotky m/s.

Přepínače na desce slouží každý na něco jiného. První přepínač slouží k vypínání celého přístroje, druhý je připojený k mikroprocesoru aby bylo možné využít jeho polohy k přepínání

programu. Tento přepínač je určený především k přepínání měření dávky střel nebo jednotlivých střel, podle toho se musí tomu přizpůsobit program mikroprocesoru.

Tlačítka pomáhají uživateli přístroje pohodlně ovládat všechny možnosti programu. Prostředních šest tlačítek funguje jako šipky, kterými se uživatel dostane v obou směrech ve třech rozměrech, tedy doprava, doleva, nahoru, dolů, dovnitř a ven. Tlačítko umístěné nalevo od této šestice tlačítek je tlačítko pro změnění nebo smazání naměřeného údaje. Poslední tlačítko, umístěné napravo od šestice směrových tlačítek, je určeno k přepínání režimu měření a režimu prohlížení naměřených výsledků.



Obr.19: Panel měřicího přístroje

7 Návrh programu

Na začátku návrhu programu musíme vytvořit seznam funkcí, které bude schopen tento přístroj mít. Protože některé veličiny mohou být vyjádřeny více jednotkami, popřípadě mohou mít nějaké alternativní vyjádření, je třeba, aby byly tyto hodnoty vhodně zařazené. Kromě měření rychlosti může mít přístroj i další užitečné funkce ale u tohoto přístroje se snažím zakomponovat i funkce, které v praxi nejsou příliš použitelné, ale myslím, že by mohli být využity ke zjištění zajímavých poznatků, případně sloužit jen jako orientační ukazatel možností.
Funkce přístroje:

- rychlost
- zrychlení
- dostřel
- energie
- kadence
- indikace střel
- paměť

Rychlost je nejdůležitější měřenou veličinou, kterou je důležité udávat nejen v základních jednotkách m/s ale i také používaných jednotkách fps – stopách za sekundu. Jako zajímavost uvádím také rychlost v km/h.
Převod m/s na fps:

$$ft. = 0{,}305\ m \tag{80}$$

$$fps = 0{,}305\ m/s \tag{81}$$

Převod m/s na km/h:

$$km = 1000\ m, h = 3600\ s \tag{82}$$

$$km/h = \frac{1000\ m}{3600\ s} = \frac{1}{3{,}6}\ m/s \tag{83}$$

Zrychlení je veličina, na jejíž měření budeme potřebovat minimálně tři snímače na rozdíl od rychlosti. Zrychlení je definováno jako změna rychlosti v čase. Proto budeme měřit čas mezi prvním a druhým snímačem (t_1) a druhým a třetím snímačem (t_2), z těchto dvou časů vypočítáme rychlosti a z rozdílů těchto rychlostí vypočítáme zrychlení.

$$\frac{d}{t_1} - \frac{d}{t_2} = a\ [m/s^2] \tag{84}$$

Dostřel je veličina, kterou je velice složité vypočítat, protože zbraně které budeme měřit, používají systém Hop-up, který způsobuje zvětšení doletu kuličky. Protože systém Hop-up je laditelný plynulým nastavováním kolíku zasahujícího do hlavně a má tedy různý vliv na dolet kuličky, nedá se přesně naprogramovat ovlivnění doletu, a proto vypočítané údaje nebudou brát systém Hop-up v úvahu. Zanedbáme-li také pohyb větru a odpor vzduchu, můžeme vypočítat dolet podle vzorců pro šikmý vrh.

$$x = x_0 + v_0 t \cos\alpha \tag{85}$$

$$y = y_0 + v_0 t \sin\alpha - \frac{1}{2} g t^2 \tag{86}$$

Ve vojenské praxi se používá dostřel maximální a dostřel účinný. Dostřel maximální je definován jako vzdálenost, do které je možné střelu dopravit. Účinný dostřel je definovaný jako vzdálenost, na kterou zbraň způsobí cíli takové poškození, které ho vyřadí z dalšího boje. Maximální dostřel tedy vypočítáme jako velikost neznámé x při úsťové rychlosti v_0 a elevačním úhlu $\alpha = 45°$.
počáteční bod $[x_0, y_0] = [0, 0]$
v_0 = parametr – úsťová rychlost
$\alpha = 45°$

g = 9,81 m/s^2
t = neznámá – doba letu střely
y = 0 (výškový rozdíl střelce a cíle)

$$y = y_0 + v_0 t \sin\alpha - \frac{1}{2} g t^2 \quad (87)$$

$$0 = 0 + v_0 t \sin 45° - \frac{1}{2} 9{,}81 t^2 \quad (88)$$

$$v_0 t \sin 45° = \frac{1}{2} \cdot 9{,}81 t^2 \quad (89)$$

$$v_0 \frac{\sqrt{2}}{2} = \frac{1}{2} \cdot 9{,}81 t \quad (90)$$

$$t = \frac{\sqrt{2}}{9{,}81} v_0 \quad (91)$$

$$x = x_0 + v_0 t \cos\alpha \quad (92)$$

$$x = 0 + v_0 \cdot \frac{\sqrt{2}}{9{,}81} \cdot v_0 \cdot \cos 45° \quad (93)$$

$$x = v_0^2 \cdot \frac{\sqrt{2}}{9{,}81} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \quad (94)$$

$$x = \frac{v_0^2}{9{,}81} \quad (95)$$

Účinný dostřel bychom těžko spočítali matematickou cestou, protože při univerzálnějším použití zbraně nevíme, na jaké všechny cíle mohou být zbraně použity, a nelze tomu snadno přizpůsobit výpočet. Uvažujeme-li použití airsoftových zbraní, počítá se účinný každý zásah kuličkou bez ohledu na vzdálenost nebo momentální rychlost nebo energii kuličky. Určíme proto alternativní dostřel, který pro jednoduchost budeme nazývat účinným. Tento dostřel bude definován jako dolet kuličky, která letí počáteční rychlostí v_0 ze zbraně s elevačním úhlem α = 0° ve výšce y = 1,5 m(předpokládaná výška držení zbraně).

$$y = y_0 + v_0 t \sin\alpha - \frac{1}{2} g t^2 \quad (96)$$

$$-1{,}5 = 0 + 0 - \frac{1}{2} 9{,}81 t^2 \quad (97)$$

$$3 = 9{,}81 t^2 \quad (98)$$

$$t = \sqrt{\frac{3}{9{,}81}} \quad (99)$$

$$t = 0{,}553\ s \quad (100)$$

$$x = x_0 + v_0 t \cos\alpha \quad (101)$$

$$x = 0 + v_0 \cdot 0{,}553 \cdot 1 \quad (102)$$

$$x = 0{,}553 \cdot v_0 \quad (103)$$

Čas t je vlastně čas, za který kulička spadne volným pádem o 1,5 m.

Energie kuličky je veličina, která závisí nejen na rychlosti kuličky v ale také na její hmotnosti m. Hmotnost kuličky je třeba do přístroje zadat aby bylo možné počítat energii kuličky pro různé hmotnosti. Energii kuličky budeme počítat podle vzorce:

$$E = \frac{1}{2} m v^2 \quad (104)$$

Kadence je veličina, která vyjadřuje kolik je schopna vystřelit zbraň kulek za časovou jednotku nejčastěji za minutu. Kadence je měřena jen tehdy, je-li přístroj přepnutý do režimu měření dávky střel. Přístroj měří čas mezi jednotlivými výstřely a z každého může vypočítat kadenci. Protože měření kadence znamená měřit větší časové intervaly než při měření rychlosti střely, je potřeba použít časovač s předděličkou a to ještě nejlépe 16ti bitový. Protože měření časových intervalů pro měření kadence a měření úsťové rychlosti střely probíhá ve stejný čas, je potřeba použít dva časovače.

$$K = \frac{t_m}{t_n} + 1 \quad [střel\ za\ minutu] \quad (105)$$

K ..... kadence [střel za minutu]
t_m ..... minuta = 60 s

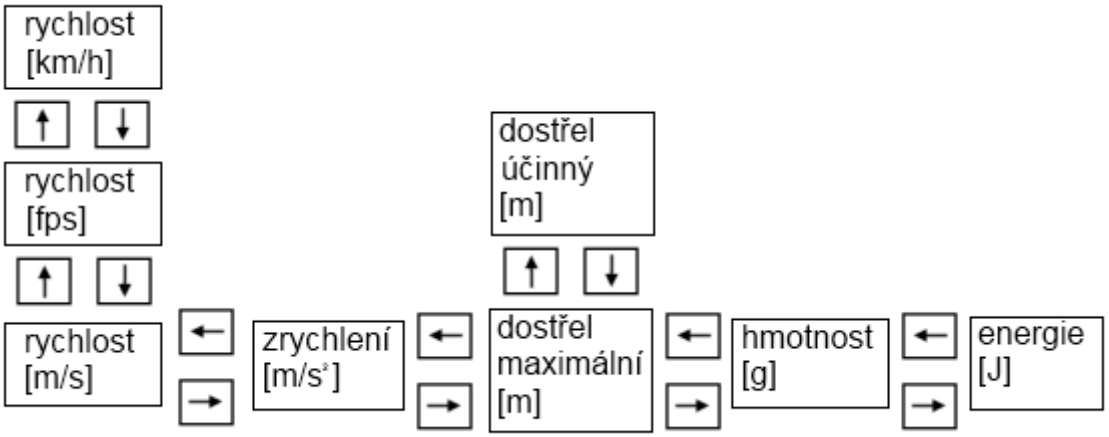
t_n ..... čas mezi jednotlivými střelami [s]

Indikace střel je hlavní funkce tří LED diod připojených na mikroprocesor. Tyto diody budou signalizovat zaznamenání průletu senzorem. Pokud tedy nějaký senzor nezachytí pohyb projektilu v měřicí trubce, bude na diodách vidět chyba. Následkem může být nefunkčnost některých výpočtů.

Paměť na naměřené hodnoty je funkce, která se v takovém přístroji hodí pro porovnávání jednotlivých výsledků. Celý program, kromě měřicího režimu je vlastně vytvořen na rychlé prohlížení nejen zrovna naměřených výsledků ale také celé paměťové databáze. Protože samotné mikroprocesory většinou nemají moc místa na uložení dat takové velikosti, můžeme si dovolit uložit jen málo údajů. Pokud ukládáme hodnoty z režimu měření jednotlivých střel, stačí nám uložit dvě rychlosti naměřené mezi senzory a hodnotu hmotnosti zadanou do přístroje. Pokud však ukládáme hodnoty z měření dávky střel, musíme uložit také hodnoty kadence, to všechno podle nastaveného počtu střel v dávce. Zbývající údaje budou dopočítány z hodnot naměřených a uložených. Do jedné dávky jsem určil 10 střel, aby byly vidět rozdíly mezi rychlostmi, kadencí a dalšími údaji. Hmotnost střel je jednotná, proto stačí uložit jen jediné číslo. Aby paměť vystačila i na jednotlivé střely, je možné uložit jen asi dvě nebo tři dávky. Paměť pro jednotlivé střely by měla mít místo alespoň pro 10 měření.

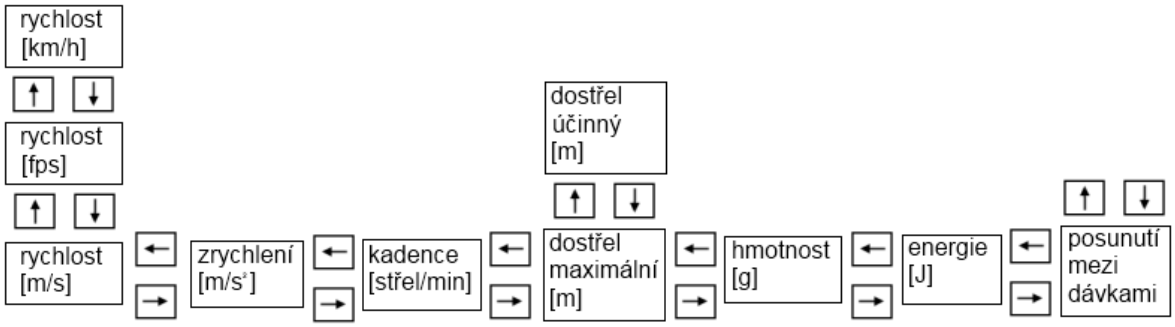
Program bude zobrazovat na displeji číslo měření, název veličiny, hodnotu naměřenou nebo vypočítanou a jednotku. Program po naměření rychlosti střely se sám přepne do zobrazovacího režimu a rovnou ukáže naměřenou rychlost. Na další naměřené veličiny je možné se přepínat pomocí šipek doprava a doleva. Pokud máme na displeji rychlost, můžeme šipkami nahou a dolů přepínat její jednotky, stejnými šipkami můžeme také u dostřelu přepínat mezi maximálním a účinným dostřelem. Zbývající dvojice šipek slouží mezi přepínáním jednotlivých střel v databázi měření a umožňuje tak snadno porovnávat jednotlivá měření. Pokud máme zapnutý režim měření dávek střel tak těmito šipkami přepínáme mezi jednotlivými střelami v dávce. Mezi jednotlivými dávkami posunujeme pomocí funkce posunutí, která je zařazena za jednotlivé funkce. Protože pro vypočítání energie je třeba zadat hmotnost kuličky, tak v kolonce hmotnost můžeme zmáčknout tlačítko změnit/smazat a poté pomocí šipek nahoru a dolů nastavíme hodnotu hmotnosti. Protože nechceme do přístroje zadávat většinou stále tu stejnou hmotnost, přístroj si bude automaticky pamatovat hmotnost použitou v minulém měření. Když chceme změřit další střelu nebo dávku, zmáčkneme tlačítko měření a přístroj se připraví do režimu měření a čeká na výstřel. Až kulička proletí měřicí trubkou a mikroprocesor vypočítá všechny parametry, vrátí se sám zpět do zobrazovacího režimu. Pokud si svoje měření rozmyslíme, můžeme se do zobrazovacího režimu vrátit opětovným stisknutím tlačítka měření.

Blokové schéma programu pro měření jednotlivých střel



Obr.20: Blokové schéma programu pro měření jednotlivých střel

Blokové schéma programu pro měření dávek střel



Obr.21: Blokové schéma programu pro měření dávek střel

Protože návrh celého uvažovaného programu a realizace plnohodnotného měřicího přístroje by byl značně časově náročný, rozhodl jsem se pro realizaci jen zjednodušené verze, která byla již částečně popsána výše. Tato zjednodušená verze neobsahuje přepínání měření jednotlivých střel a dávek střel ale měří jen jednotlivé střely. Dalším omezením je absence všech funkcí kromě právě měření rychlosti. Měření rychlosti provádí jen s přesností na celá čísla. Výsledek měření zobrazuje jednoduše pomocí tří LED diod, jedna dioda zobrazuje stovky, druhá desítky a třetí jednotky hodnoty rychlosti v m/s. Jediné tlačítko, které je k tomuto měření potřeba je tlačítko měření, kterým uvádíme přístroj do stavu připravenosti k měření další rychlosti. Tato zjednodušená verze samozřejmě neobsahuje žádné možnosti uložení naměřených údajů nebo připojení periférie. Tato zjednodušená verze je realizována na desce plošných spojů, která je připravena i k použití téměř plnohodnotné verze přístroje.

Zdrojový kód programu začíná nastavení tlačítka měření jako vstupní zařízení na portu B a tří LED diod jako výstupní zařízení a tří fototranzistorů jako vstupní zařízení portu D.

```
int main (void)
{
int v, a, b1, b2, b3, c, d;

DDRB = 0b11111110;
DDRD = 0b11110001;

PORTD = 0b11111111;
```

Následuje testovací část, která ukáže, zda připojené LED diody správně fungují.

```
PORTD = 0b10001111;
    for(d = 0; d<1000000; d++)
    {}

PORTD = 0b11111111;
    for(d = 0; d<1000000; d++)
    {}
```

Následně pokud není zmáčknuté tlačítko měření, jsou kontrolovány přerušení laserů.

```
while (bit_is_set(PINB,7))
{
```

Pokud je přerušen první laser, spustí se časovač a rozsvítí se LED1 jako indikace průletu prvním laserem.

```
if (bit_is_clear(PIND,4))
    {
    TCCR1B = (1<<CS10);
    PORTD = 0b10111111;
    }
```

Pokud je přerušen druhý laser, zjistíme, zda byl před tím přerušen první laser, to zjistíme pomocí indikace LED1. Pokud byl před tím přerušen první laser, tak zastavíme časovač, uložíme jeho hodnotu, vynulujeme ho a zapneme indikaci LED1 a LED2. Pokud první laser přerušen nebyl, zapneme časovač a nastavíme indikaci jen na LED2.

```
if (bit_is_clear(PIND,5))
    {
    if (bit_is_clear(PIND,1))
        {
        TCCR1B = (0<<CS10);
        a = TCNT1;
        TCNT1 = 0;
        PORTD = 0b10011111;
        }
    else    {
        TCCR1B = (1<<CS10);
        PORTD = 0b11011111;
        }
    }
```

Pokud je přerušen třetí laser, zjistíme, jestli byly přerušeny předchozí dva lasery, v případě, že byl přerušen jen první laser, nastavíme indikaci na LED1 a LED3. V případě, že byly přerušeny oba předchozí lasery, nastavíme indikaci LED1, LED2 a LED3. V případě, že byl přerušen jen druhý laser, zastavíme časovač, uložíme jeho hodnotu, vynulujeme ho a zapneme indikaci LED2 a LED3. Pokud nebyl přerušen ani jeden z předchozích laserů, nastavíme jen indikaci LED3.

```
if (bit_is_clear(PIND,6))
    {
    switch (PIND)
        case 0b10111111:
            PORTD = 0b10101111;
            break;
        case 0b10011111:
            POTRD = 0b10001111;
            break;
        case 0b11011111:
            TCCR1B = (0<<CS10);
            a = TCNT1;
            TCNT1 = 0;
            PORTD = 0b11001111;
            break;
        default:
            PORTD = 0b11101111;
            break;
    }
```

Tímto kontrolováním přerušení všech laserů získáme větší pravděpodobnost, že přístroj úspěšně změří úsťovou rychlost, indikace průletu pomocí LED diod nám napoví, jak dobře všechny laserové snímače fungují.

Po úspěšném naměření časového intervalu vypočítáme z použitého kmitočtu 1MHz naměřenou rychlost. Tuto rychlost následně rozdělíme na stovky, desítky a jednotky.

```
v = 1000000/a;
b1 = v/100;
b2 = v/10 - b1*10;
b3 = v - b2*10 -b1*100;
```

Po následném zmáčknutí tlačítka...

```
while (bit_is_clear(PINB,7))
{}
```

...začne postupné zobrazování hodnoty rychlosti v m/s. Nejdříve stovky, potom desítky a jednotky.

```
for (c = 0; c<b1; c++)
{
    PORTD = 0b10111111;
    for(d = 0; d<1000000; d++)
    {}
    PORTD = 0b11111111;
    for(d = 0; d<1000000; d++)
    {}
}
```

Po zobrazení přístroj počká na zmáčknutí tlačítka a potom přejde na začátek programu a bude opět připraven na měření další hodnoty.

```
while (bit_is_clear(PINB,7))
{}
    goto zacatek;
```

Tento program byl určen nejdřív jako testovací, pro základní fungování tohoto přístroje.

Periférie

Přestože plnohodnotná výbava tohoto přístroje je schopná úspěšně měřit všechny výše uvedené veličiny, měl bych několik nápadů, které by mohla používat třeba nějaká vylepšená verze tohoto přístroje. Některé z těchto nápadů by bylo možné realizovat a připojovat k tomuto zařízení.

První z těchto periférií by mohla být tiskárna, kterou používají některé verze hradlových měřicích přístrojů. Tyto tiskárny vytisknou aktuální naměřené výsledky. Tiskárna může být připojena k přístroji například přes USB.

Další užitečnou věcí by mohl být chytač střel. Provedení si představuji jako krabičku snadno ale pevně přidělanou k měřicímu přístroji, ve které by byla měkká měnitelná výstelka. Výhodou je, že je to vylepšení čistě mechanické a není třeba kvůli tomu měnit program. Nevýhodou je určitě rychlé opotřebení výstelky (z jakéhokoli použitelného materiálu), v případě zanedbání výměny výstelky může dojít ke zpětnému odrazu střely a tak riziku úrazu nebo poškození přístroje.

Zajímavou a užitečnou věcí by mohla být nějaká externí paměť. Na tu by se dalo zaznamenávat i větší množství přesnějších dat.

Protože někteří uživatelé si mohou stěžovat na špatnou čitelnost údajů z malého LCD panelu, mohou si na vyvedené piny portu A připojit jakýkoli jiný externí LCD panel. Ovšem proto, aby byl jiný LCD panel funkční na stejném portu, musel by být první panel nějakým způsobem odpojitelný.

Ne příliš využitelnou ale přesto pohodlnou věcí by se mohla stát obyčejná numerická klávesnice využitelná v našem případě jen pro zadávání hodnot hmotnosti střel.

Uživatele, který by se více zajímal o měření dávek střel, by mohla zajímat matice LED diod, která by mohly sloužit k indikaci průletu každým senzorem pro každou střelu.

Následující periférie jsou už využitelné spíše v mnohem profesionálnějším měřítku. Pokud chceme určovat co nejpřesnější dráhu střely, je vhodné propojit přístroj s počítačem, kde by pomocí simulace mohl započítat i takové věci jako je změřená rychlost a směr větru. Měnící se rychlost postupným způsobem by mohly změřit další přidané snímače, nastaly by však problémy popsané v kapitole o konstrukci trubky a snímačů. Bylo by to řešitelné jen pevným uchycením zbraně popsaným v téže kapitole.

8 Závěr

Balistika je velice zajímavý fyzikální obor, ve kterém je spousta veličin, které se velice špatně měří. Proto jsem rád, že jsem byl schopen navrhnout přístroj, který je schopen přesně změřit několik veličin přechodové balistiky především airsoftových zbraní, tedy zbraní s úsťovou rychlostí do 200 m/s. Přístroj by měl být schopen měřit rychlost, zrychlení a energii střely u ústí hlavně, dále přístroj orientačně určuje dva druhy dostřelu.

V teoretickém úvodu se pokouším najít a popsat možnosti snímání při měření rychlosti střely. Možnosti řešení měřicího přístroje nám poskytují i příležitost měření zrychlení a dalších funkcí. Srovnám-li navrhnutý přístroj s profesionálními přístroji uvedenými v kapitole Chronometry a chronografy, tak profesionální přístroje jsou většinou jednodušší a jsou napájeny obyčejnými tužkovými bateriemi. Navrhnutý přístroj je napájen 9V baterií. Profesionální přístroje ale nemají tolik možností měření, většinou se zabývají změřením nejdůležitějších veličin, jakými jsou rychlost v m/s, rychlost v fps a energii kuličky pro hmotnost kuličky 0,2 g. Lepší a využitelnější funkce mají jen hradlové měřicí přístroje, které mají potřebné funkce na velice dobré úrovni, které však odpovídá cena těchto přístrojů, pohybující se přibližně od 3000 Kč výše. Náklady na výrobu navrhnutého přístroje jsou však mnohem menší a to do 1000 Kč, což je cena, do které se nevejdou ani ostatní profesionální přístroje.

Co se týče realizace tohoto navrhnutého přístroje, je třeba dodat, že se nepodařilo tento přístroj uvést do funkčního stavu, protože jsem udělal chybu při návrhu připojení senzorů k mikroprocesoru. Řešení této chyby spočívá v novém navrhnutí připojení senzorů k mikroprocesoru, odzkoušení zapojení na nepájivém poli a následně aplikování nalezené možnosti do vytvořeného přístroje.

9 Seznam použité literatury

[1] Ji Liu; Lixia Yu; Laser-based apparatus for measuring projectile velocity. In proceedings of the 9th International Conference on Electronic Measurement and Instruments ICEMI 2009, p. 2-595 - 2-598

[2] BALISTIKA.CZ, Dostupné na WWW: <http://www.balistika.cz/index.html>

[3] WIKIPEDIE, *Balistika*. 22.1.2011, Dostupné na WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Balistika>

[4] WIKIPEDIE, *Magnusův jev*. 30.9.2010, Dostupné na WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Magnus%C5%AFv_jev>

[5] WIKIPEDIE, *Airsoft*. 23.5.2011, Dostupné na WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Airsoft>

[6] EBAIRSOFT, Dostupné na WWW: <http://www.ebairsoft.com/fidragon-plastic-light-weight-chronoscope-p-1367.html>

[7] EBAIRSOFT, Dostupné na WWW: <http://www.ebairsoft.com/xcortech-x3200-shooting-chronograph-p-2513.html>

[8] ONLINE CB625 MANUAL, Dostupné na WWW: <http://www.combro.co.uk/cb625/index.html>

[9] BEST PATRON.EU, Dostupné na WWW: <http://bestpatron.shop5.cz/cz-detail-204353-elektronicka-hradla-f1-master-chrony.html>

[10] MERCURY AIRSOFT, Dostupné na WWW: <http://www.mercuryairsoft.com/en/accessories/chronometer/crono-de-mano.htm>

[11] MICROCHIP, *PIC12LCE519T-04-SN.pdf* .1999.Dostupné na WWW: <http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/P/I/C/1/PIC12LCE519T-04_SN.shtml>

[12] FREESCALE, *dsh.436-006.1.pdf* .2005.Dostupné na WWW: <http://www.alldatasheet.com>

[13] INTEL, *1046235_1.pdf* .Dostupné na WWW: <http://www.gme.cz/cz/8051-p432-005.html>

[14] ATMEL, *doc2466.pdf* .2010.Dostupné na WWW: <http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2466.pdf>

[15] ATMEL, *doc2467.pdf* .2011.Dostupné na WWW: <http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2467.pdf>

10 Seznam použitých zkratek a symbolů

F_g	tíhová síla
F_{od}	síla odporu vzduchu
t_c	délka cyklu
t_s	celkový čas střely mezi snímači
f	frekvence
v	rychlost
N	počet cyklů
d	vzdálenost snímačů
a	počet bitů
b	minimální měřená rychlost při minimálním počtu bitů
c	doporučený počet bitů
Δv	rozdíl rychlostí
fps	stopy za sekundu
ft	stopa
K	kadence

11 Příloha

Zdrojový kód programu

```
#include <avr/io.h>                                  // hlavickovy soubor popisujici mikrokontroler
#include <avr/interrupt.h>                                  // knihovna potrebna pro preruseni
#include <stdio.h>


int main (void)
{
int v, a, b1, b2, b3, c, d;

DDRB = 0b11111110;                                      //jedine tlacitko nastavene na vstupni
DDRD = 0b11110001;                                    //tri vystupni LED a tri vstupni tranzistory

PORTD = 0b11111111;

zacatek:

PORTD = 0b10001111;
for(d = 0; d<1000000; d++)
{}

PORTD = 0b11111111;
for(d = 0; d<1000000; d++)
{}

while (bit_is_set(PINB,7))
{

if (bit_is_clear(PIND,4))              //je-li preruseny laser1
{
TCCR1B = (1<<CS10);                  //spusti se casovac
PORTD = 0b10111111;
}

if (bit_is_clear(PIND,5))            //je-li preruseny laser2
{
if (bit_is_clear(PIND,1))
{
TCCR1B = (0<<CS10);                  //vypne se casovac
a = TCNT1;                           //ulozi se hodnota
TCNT1 = 0;                           //vynuluje se casovac
PORTD = 0b10011111;
}
else
{
TCCR1B = (1<<CS10);                //spusti se casovac
PORTD = 0b11011111;
}
```

```
}
if (bit_is_clear(PIND,6))            //je-li preruseny laser3
{
switch (PIND)
case 0b10111111:
            PORTD = 0b10101111; break;
case 0b10011111:
            POTRD = 0b10001111; break;
case 0b11011111:
      TCCR1B = (0<<CS10);   //vypne se casovac
       a = TCNT1;               //ulozi se hodnota
       TCNT1 = 0;               //vynuluje se casovac
       PORTD = 0b11001111; break;
default:
            PORTD = 0b11101111; break;
}
}
v = 1000000/a;          //vypocet rychlosti ze strojovych cyklu
b1 = v/100;             //vypocet zobrazeni rychlosti
b2 = v/10 - b1*10;
b3 = v - b2*10 -b1*100;

while (bit_is_clear(PINB,7))       //je-li stisknute tlacitko mereni
{}

for (c = 0; c<b1; c++)             //zobrazovani stovek na LED1
{
PORTD = 0b10111111;
for(d = 0; d<1000000; d++)
{}
PORTD = 0b11111111;
for(d = 0; d<1000000; d++)
{}
}
for (c = 0; c<b2; c++)             //zobrazovani desitek na LED2
{
PORTD = 0b11011111;
for(d = 0; d<1000000; d++)
{}
PORTD = 0b11111111;
for(d = 0; d<1000000; d++)
{}
}
for (c = 0; c<b3; c++)           //zobrazovani jednotek na LED3
{
PORTD = 0b11101111;
for(d = 0; d<1000000; d++)
{}
PORTD = 0b11111111;
for(d = 0; d<1000000; d++)
{}
}
```

```
while (bit_is_clear(PINB,7))          //je-li stisknute tlacitko mereni
{}
goto zacatek;
}
```

Deska plošných spojů

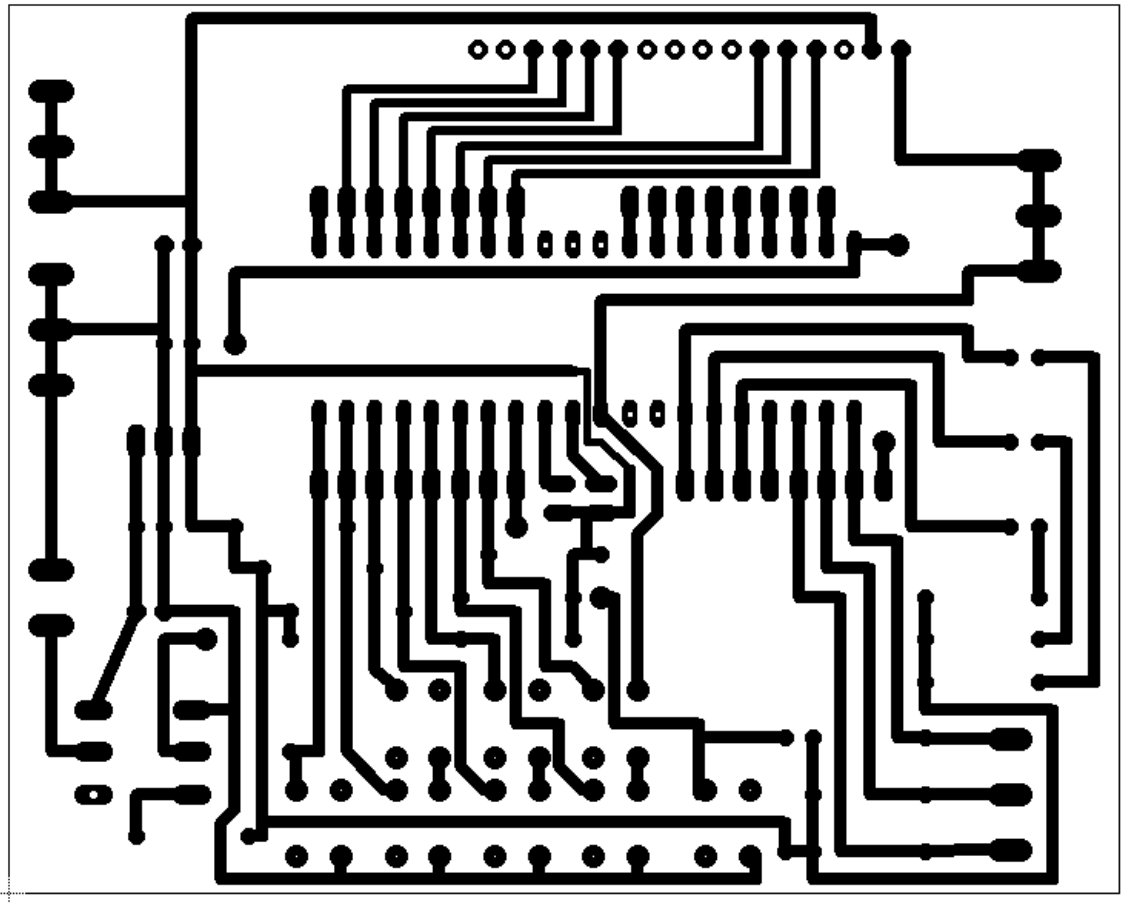
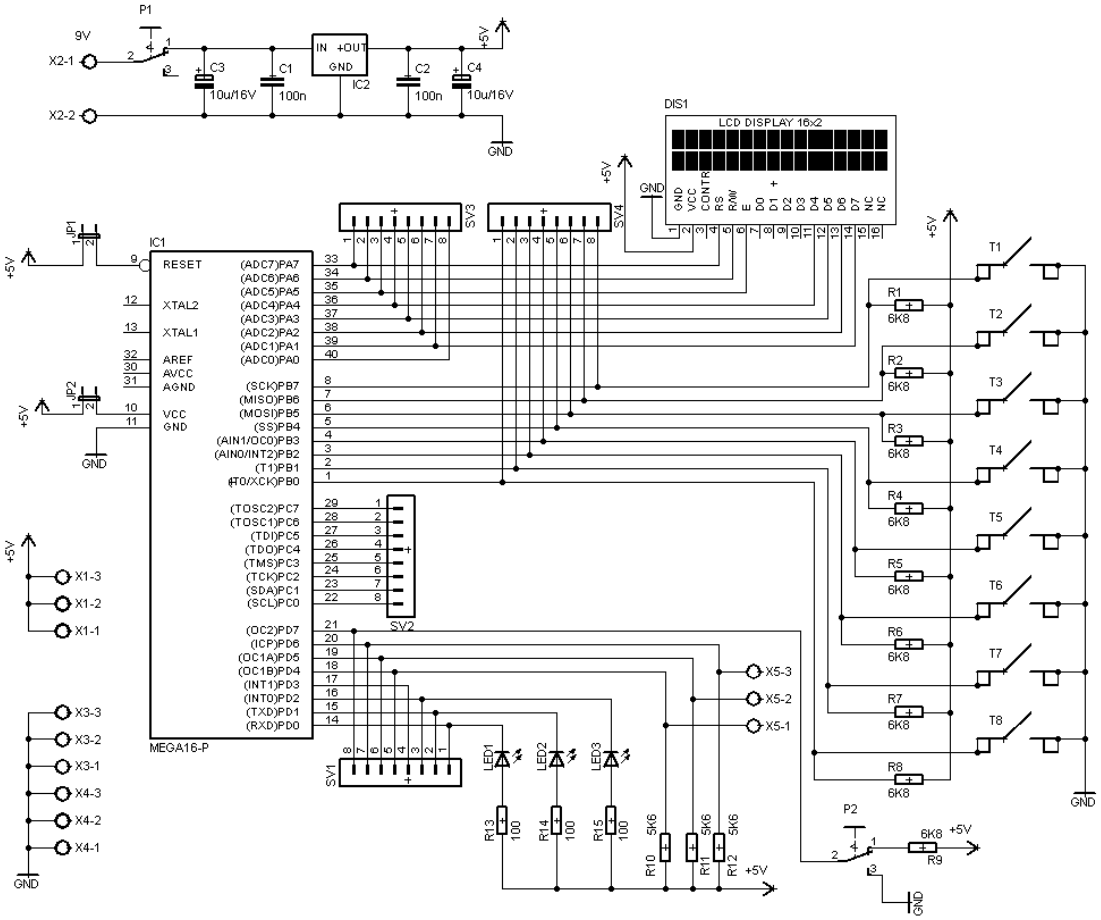
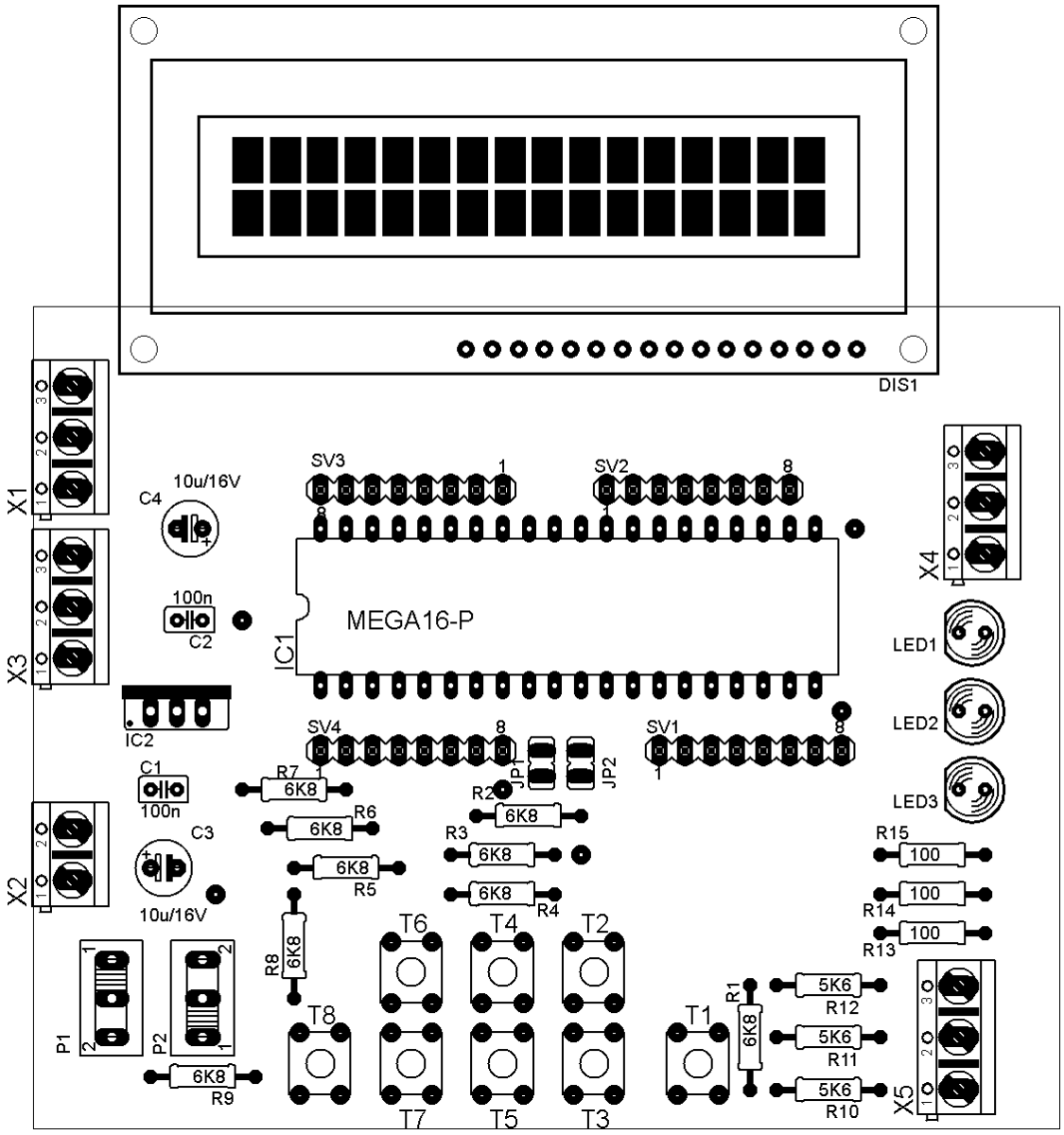


Schéma zapojení



Osazení součástek na desce