



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

DETEKČNÍ BRÁNA PRŮJEZDU SPORTOVIŠTĚM

DETECTION GATE FOR PASSING THROUGH THE SPORTS FIELD

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jeroným Komanec

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Vladimír Levek, Ph.D.

BRNO 2025

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Mikroelektronika a technologie**

Ústav mikroelektroniky

Student: Jeroným Komanec

ID: 240851

Ročník: 3

Akademický rok: 2024/25

NÁZEV TÉMATU:

Detekční brána průjezdu sportovištěm

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte a realizujte zařízení, umožňující detekovat kontrolní průjezd stanovištěm za účelem sportovního měření. Zařízení bude odpočítávat přesný čas mezi průchody, tento čas zobrazovat a také jeho hodnoty odesílat do počítače. Nejdříve prostudujte vhodné technologie umožňující snímání průjezdu a popište je. Dále popište všechny další dotčené technologie potřebné pro návrh. Zařízení navrhněte, realizujte a proveďte potřebná měření a ověření spolehlivého provozu. Všechny kroky návrhu a realizace řádně zdokumentujte v bakalářské práci.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 10.2.2025

Termín odevzdání: 5.6.2025

Vedoucí práce: Ing. Vladimír Levek, Ph.D.

doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem, realizací a testováním zařízení pro měření časových intervalů mezi průjezdy robotického závodníka časovací branou. Na základě provedené rešerše možných detekčních metod byla zvolena infračervená optická detekce se signálem modulovaným na 38 kHz. Navržené zařízení je založeno na mikrokontroleru ATmega328p a komunikuje s uživatelem pomocí LCD displeje a volitelného USB připojení k počítači. Kromě návrhu a zapojení desek plošných spojů se práce věnuje i implementaci firmwaru a softwarové korekci nepřesností interního RC oscilátoru.

Klíčová slova

Časovací brána, měření času, mikrokontroler ATmega328p, detekce paprsku, modulace signálu, infračervený paprsek, RC oscilátor, Robotárna, USB, SPI, ISP, UART, I2C.

Abstract

This bachelor's thesis focuses on design, implementation, and testing of a device for measuring the lap time of a robotic racer on an enclosed circuit. Based on an analysis of possible detection methods, an infrared beam modulated at 38 kHz was chosen. The proposed device is built around the ATmega328p microcontroller and communicates with the user via an LCD display and an optional USB connection to a personal computer. In addition to the design and layout of printed circuit boards, the thesis also addresses the implementation of firmware and software-based correction of inaccuracies in the internal RC oscillator.

Keywords

Timing gate, time measurement, ATmega328p microcontroller, beam detection, signal modulation, infrared beam, RC oscillator, Robotárna, USB, SPI, ISP, UART, I2C.

Bibliografická citace

KOMANEC, Jeroným. *Detekční brána průjezdu sportovištěm*. Bakalářská práce. Vladimír LEVEK (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2025.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	Jeroným Komanec
VUT ID studenta:	240851
Typ práce:	Bakalářská práce
Akademický rok:	2024/25
Téma závěrečné práce:	Detekční brána průjezdu sportovištěm

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího závěrečné 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 závěrečné 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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 3. června 2025

podpis autora

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu práce Ing. Vladimíru Levkovi, Ph.D. a doc. Ing. Pavlu Šteffanovi, Ph.D. za konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci. Také děkuji Ing. Robertu Komancovi za kontrolu pravopisu.

V Brně dne: 3. června 2025

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	9
SEZNAM TABULEK.....	10
ÚVOD	11
1 TEORETICKÝ ROZBOR.....	12
1.1 MOŽNOSTI SNÍMÁNÍ CÍLOVÉ ČÁRY	12
1.1.1 Manuální snímání cílové čáry.....	12
1.1.2 Membránový spínač	12
1.1.3 Snímání pomocí čipů radiofrekvenční identifikace	13
1.1.4 Snímač přerušeni paprsku.....	14
1.1.5 Fotografické snímání cíle.....	16
1.2 MIKROKONTROLERY	17
1.2.1 Mikrokontroler ATmega328p	17
1.3 TYPY SOUČÁSTEK PRO OSAZENÍ DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ	18
1.3.1 Součástky s drátovými vývody (THT)	18
1.3.2 Součástky pro povrchovou montáž (SMD)	19
1.4 KOMUNIKAČNÍ SBĚRNICE	19
1.4.1 SPI.....	19
1.4.2 I2C	21
1.4.3 UART	22
1.5 ZAZNAMENÁNÍ SIGNÁLU MIKROKONTROLEREM	23
1.5.1 Vzorkování	23
1.5.2 Přerušeni.....	23
2 NÁVRH A REALIZACE ZAŘÍZENÍ.....	25
2.1 FUNKČNÍ PRINCIP.....	25
2.2 NÁVRH DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ	27
2.2.1 Zapojení LED a jejich napájení	27
2.2.2 Hlavní vyhodnocovací deska.....	28
2.2.3 Modulátor a emitor	30
2.2.4 Detektor a demodulátor	32
2.3 TESTOVÁNÍ ZAŘÍZENÍ	33
2.3.1 Nepřesnost frekvence modulační vlny	33
2.3.2 Dvojitě zaznamenání	34
2.3.3 Korekce nepřesnosti zařízení	34
3 POPIS ZAŘÍZENÍ	36
3.1 POPIS ZAŘÍZENÍ.....	36
3.2 FUNKCE SAMOSTATNĚ.....	38
3.3 FUNKCE PŘI PŘIPOJENÍ DO POČÍTAČE	38
3.3.1 Ukládání dat.....	38
4 ZÁVĚR.....	42
LITERATURA.....	43

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	46
SEZNAM PŘÍLOH.....	47

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Zjednodušená konstrukce membránového tlačítka, převzato z [2].....	12
1.2	Voltampérová charakteristika fotodiody pro různé intenzity osvětlení, převzato z [7]	15
1.3	Příklad amplitudové modulace digitálního signálu, převzato z [8]	16
1.4	Porovnání snímků klasického fotoaparátu (nahore) a páskového fotoaparátu (dole), převzato z [10]	17
1.5	Závislost frekvence interního RC oscilátoru na teplotě při provozním napětí 5 V (data převzata z [11, s. 274])	18
1.6	Zapojení pro komunikaci se třemi periferními zařízeními pomocí sběrnice SPI, převzato z [12]	20
1.7	Připojení ISP na desku Arduino nano (vlevo), označení jednotlivých vývodů (vpravo), převzato z [14].....	21
1.8	Zapojení sběrnice I2C se třemi řídicími a třemi řízenými zařízeními, převzato z [15]	22
2.1	Blokové schéma návrhu finálního zařízení s možností připojení počítače nebo programátoru	25
2.2	Vývojový diagram algoritmu finálního zařízení s možností odeslání naměřených dat do počítače..	26
2.3	Schéma zapojení indikační LED s ochranným rezistorem, spínacím tranzistorem a pull-down rezistorem zajišťujícím rozepnutí obvodu.....	28
2.4	Schéma zapojení integrovaného obvodu FT232RL jako převodníku rozhraní USB na UART	29
2.5	Osazená hlavní deska plošných spojů s mikrokontrolerem ATmega328p, komunikačními rozhraními (USB, RJ-11, I2C) a USB – UART převodníkem	30
2.6	Typické zapojení časovače Ti NE555 v astabilním módu, převzato z [19, s. 9]	30
2.7	Schéma zapojení časovače Ti NE555 pro generování nosné vlny modulace o frekvenci blízké 38 kHz.....	31
2.8	Osazená deska plošných spojů s časovacím obvodem Ti NE555 generující nosnou modulační vlnu, emitorem a konektorem RJ-11	32
2.9	Blokové schéma detektoru a demodulátoru TSSP4038, převzato z [20, s. 1]	33
2.10	Osazená deska plošných spojů s detektorem, demodulátorem TSSP4038 a konektorem RJ-11	33
2.11	Průběh výstupního napětí z obvodu s Ti NE555 generujícího nosnou vlnu pro modulaci, zaznamenáno pomocí osciloskopu Rigol MSO1074z	34
3.1	Hotové zařízení časovací brány.....	37
3.2	Popis LCD displeje zařízení	38
3.3	Příklad zobrazení připojeného zařízení ve správci zařízení operačního systému Windows při správné instalaci ovladačů.....	39
3.4	Menu pro spuštění, nebo ukončení ukládání dat přijatých ze zařízení	40
3.5	Ovládací panel programu CoolTerm	40
3.6	Příklad výstupního souboru se dvěma měřeními.....	41

SEZNAM TABULEK

2.1	Vypočtené hodnoty minimálních odporů ochranných rezistorů dle hodnot převzatých z datových listů použitých LED a rovnice 2.1	27
2.2	Základní technické parametry mikrokontroleru ATmega328p, převzato z [11, s. 1–2]	28
2.3	Hodnoty pasivních součástek pro generátor nosného signálu modulace s frekvencí blízkou 38 kHz vypočtených dle rovnic 2.2 a 2.3	31
2.4	Iterativní zpřesňování výsledného koeficientu korekce pro narůstající časové intervaly	35

ÚVOD

Měření času je klíčovým prvkem při organizaci mnoha typů soutěží, především těch založených na rychlosti. V mnoha případech se výsledné časy soutěžících liší pouze o několik stovek, či dokonce desítek, milisekund a vzhledem k průměrné reakční době člověka nelze takto malé rozdíly rozeznat, ani správně zaznamenat. Tento problém se týká i organizátorů vzdělávacího projektu „Robotárna“, kteří pořádají závody autonomních robotů po předem vymezených tratích a potřebují zajistit objektivní a přesné měření času jednotlivých účastníků.

Dostupná profesionální řešení, která by tento problém spolehlivě řešila, jsou často finančně náročná a svou komplexností, nebo rozměry, nevyhovují potřebám organizátorů menších soutěží. Vzhledem k těmto omezením vzniká potřeba vyvinout vlastní měřicí systém, který by představoval kompromis mezi cenovou dostupností, přesností, technickou proveditelností a přenositelností.

Cílem této bakalářské práce je navrhnout, sestavit a naprogramovat zařízení umožňující automatizované měření času robotického závodníka jedoucího po předem dané uzavřené trati. V rámci potřeb organizátorů výše zmiňovaného projektu bude zařízení možno použít jak samostatně, tak ve spojení s osobním počítačem pro zaznamenávání jednotlivých výsledných časů.

První část práce se zabývá teoretickým rozбором možných technologií použitelných k záznamu překonání startovní a cílové čáry robotickým závodníkem, následné kapitoly popisují výběr konkrétních komponent, návrh samotného zařízení a jeho testování. V závěru tato práce obsahuje návod k použití sestrojeného zařízení s možností záznamu dat do osobního počítače pro pozdější zpracování organizátory.

1 TEORETICKÝ ROZBOR

Tato kapitola se věnuje teoretickému rozboru technologií použitelných k detekci průjezdu robotického závodníka startovní a cílovou čarou. Cílem je zmíněné možnosti detekce porovnat z hlediska přesnosti, spolehlivosti a složitosti implementace. Součástí kapitoly je také přehled dalších technologií nezbytných pro následný návrh a realizaci zařízení.

1.1 Možnosti snímání cílové čáry

1.1.1 Manuální snímání cílové čáry

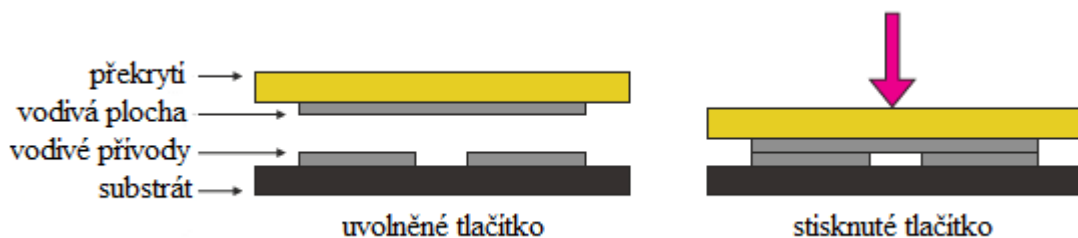
Nejjednodušším a nejstarším způsobem, jak změřit čas závodníka je využití ručních stopek ovládaných rozhodčím, který zároveň sleduje překonání cílové čáry závodníkem. Tento způsob měření je používán zejména v amatérských soutěžích, kde není k dispozici jiný typ měření.

Rozhodčí, který má na starosti měření času, spustí stopky při prvním i druhém překonání cílové čáry závodníkem a finální čas je odečten z displeje stopek. Hlavními nevýhodami tohoto způsobu měření jsou nepřesnost a nekonzistentnost způsobená převážně reakční dobou rozhodčího, která se v průměru pohybuje okolo 0,2 s [1, s. 2]. Vzhledem ke své jednoduchosti se ale tento typ měření stále často používá jako záložní typ měření.

1.1.2 Membránový spínač

Alternativní metodou k ručnímu měření je využití membránového snímače, typicky ve formě tlačítka, umístěného na cílové čáře. Tato metoda je jednoduchým způsobem, jak mechanicky detekovat okamžik, kdy závodník překoná cílovou čáru, a umožňuje tak automatické spuštění a zastavení časomíry.

Membránový spínač se skládá ze čtyř základních částí. Dolního substrátu, který umožňuje fixaci zařízení, vodivých přívodů s nevodivou mezerou mezi nimi, vodivé plochy připevněné ke krycí vrstvě a krycí vrstvy, zajišťující ochranu celého spínače před vnějšími vlivy a přerušování obvodu při uvolnění tlačítka.



Obrázek 1.1 Zjednodušená konstrukce membránového tlačítka, převzato z [2]

Při stisknutí membránového tlačítka dostatečnou silou dojde k pružnému natažení krycí vrstvy a spojení vodivých přívodů pomocí vodivé plochy připevněné k ní. Takto propojený obvod poté umožňuje průtok proudu, a tím detekci stisknutí dalším zařízením, až do momentu uvolnění síly držící spínač ve stisknuté poloze. Při uvolnění spínače se krycí vrstva vrátí do původního tvaru, což způsobí přerušování obvodu.

Výhodami této technologie jsou:

- eliminace nekonzistentní reakční doby člověka,
- jednoduchost implementace,
- nízká cena.

Hlavními nevýhodami této technologie jsou:

- potřeba fyzického kontaktu závodníka se spínačem (což může ovlivnit jeho rychlost pohybu),
- potřeba dostatečného tlaku na spínači (příliš lehký závodník jej nespustí),
- omezená živostnost (mechanická podstata membránového snímače omezuje možný počet stlačení před selháním).

1.1.3 Snímání pomocí čipů radiofrekvenční identifikace

Jednou z technologií často využívaných pro automatický časový záznam velkého množství závodníků je snímání pomocí RFID (radiofrekvenční identifikace) transpondérů. Systém se skládá ze dvou komponent:

- RFID transpondér,
- RFID anténa,

kde RFID anténa umístěná na startovní / cílové čáře kontinuálně vysílá aktivační signál, který transpondéru poskytne dostatek energie, aby odpověděl svým unikátním identifikačním kódem. Tento kód je pak zaznamenán společně s časovým údajem záznamu, který umožňuje systému spočítat celkový čas závodníka na trati.

Systém RFID umožňuje použití pasivních (napájených aktivačním signálem), nebo aktivních (s vlastním napájením) transpondérů. Vzhledem k jejich nižší ceně, hmotnosti a menším rozměrům se pro měření závodů typicky používají pasivní transpondéry (např. zabudované do startovního čísla).

Hlavními výhodami snímání cílové čáry závodu pomocí technologie RFID jsou:

- rozlišení času konkrétního závodníka při velkém počtu účastníků (při hromadném startu by byl jednotný časový start nepřesný pro závodníky startující na konci, RFID anténa umístěná na startovní čáře umožní zaznamenání přesného momentu zahájení závodu každým účastníkem zvlášť),
- bezkontaktnost

Hlavní nevýhodou této technologie je její všeobecná nepřesnost vzhledem k nenulové šířce antén snímajících průchod RFID čipu (doba, kterou sledovaný závodník stráví v aktivní zóně antény přispívá k nepřesně změřenému času). [3]

1.1.4 Snímač přerušeni paprsku

Snímač přerušeni paprsku se skládá ze dvou částí: emitoru světla (paprsku) a detektoru, fotocitlivého obvodu, který detekuje změny intenzity světla dopadající na fotocitlivou součástku. Tento typ snímání se také často používá ke spuštění jiného obvodu (například ke spuštění vysokorychlostní kamery u cílové čáry závodů na olympijských hrách). [4]

Hlavní výhodou tohoto typu snímání je velmi přesné zachycení okamžiku, kdy závodník překoná startovní / cílovou čáru, jeho nevýhodou je však nemožnost od sebe závodníky rozeznat, je-li jich více.

Emitor

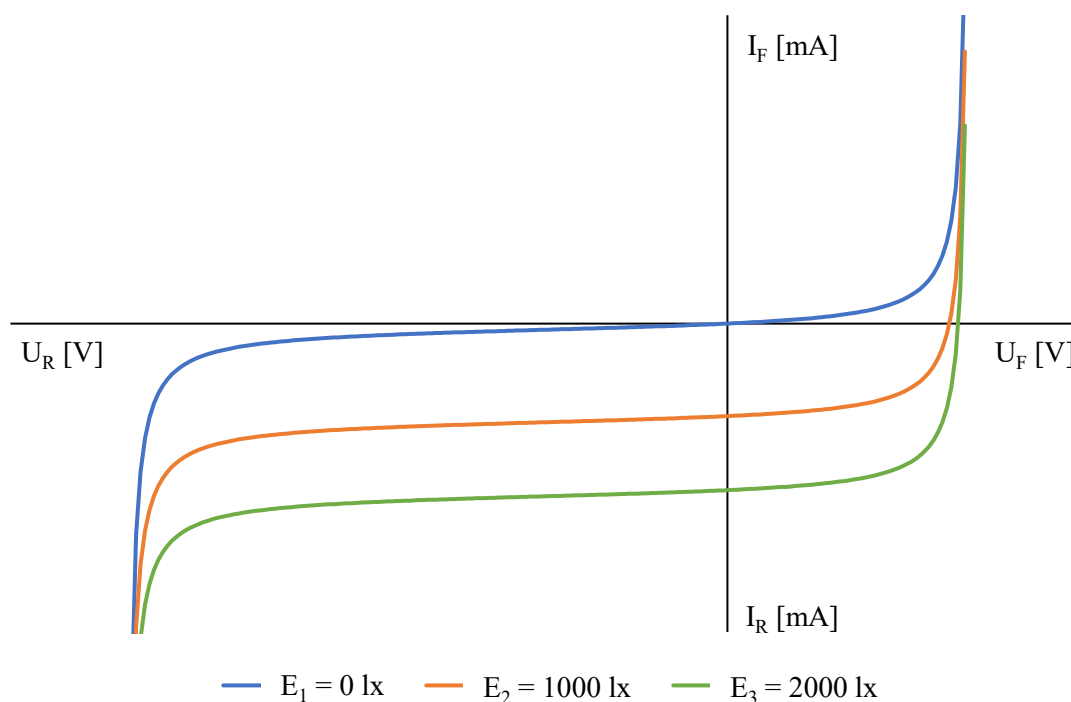
Emitorem ve snímači přerušeni paprsku bývá vhodně vybraná elektroluminiscenční dioda. V principu může být použita jakákoliv dioda produkující světlo, často se však využívá dioda vyzařující v infračerveném spektru, jelikož lidské oko není na tento typ světla citlivé, čímž se předchází iritaci uživatele blikající diodou. [5]

Detektor

Detektorem ve snímači přerušeni paprsku bývá nejčastěji fotodiody zapojená v závěrném směru. Fotodiody je polovodičová součástka tvořená PN přechodem uzpůsobeným k dopadání světla v podobě fotonů na oblast jeho zakázaného pásu, kde takto dopadající fotony mohou (mají-li energii větší, než je šířka zakázaného pásu) excitovat elektrony a vytvořit tak nový pár elektron-díra. Takto vzniklé nosiče náboje jsou následně vlivem elektrického pole přitahovány k opačným pólům PN přechodu (elektrony ke kladnému pólu, díry k zápornému), čímž vzniká proud v závěrném směru zvaný fotoproud.

Fotoproud je přímo úměrný k intenzitě osvětlení zakázaného pásu PN přechodu (3. kvadrant na obrázku 1.2). I při nulovém osvětlení fotodiody však dochází ke generaci nosičů náboje a tím pádem k procházení proudu v závěrném směru, přičemž takto vzniklý proud se označuje jako tmavý proud (na obrázku 1.2 křivka E_1 v 3. kvadrantu). [6, s. 2]

Detektor musí být v zařízení umístěn vůči emitoru takovým způsobem, aby nedocházelo k jeho vystavení vysílanému signálu ve chvíli, kdy má být signál přerušen. Tato situace může nastat například v případě, že je zařízení zhotoveno z materiálu schopného odrážet signál emitoru.



Obrázek 1.2 Voltampérová charakteristika fotodiody pro různé intenzity osvětlení, převzato z [7]

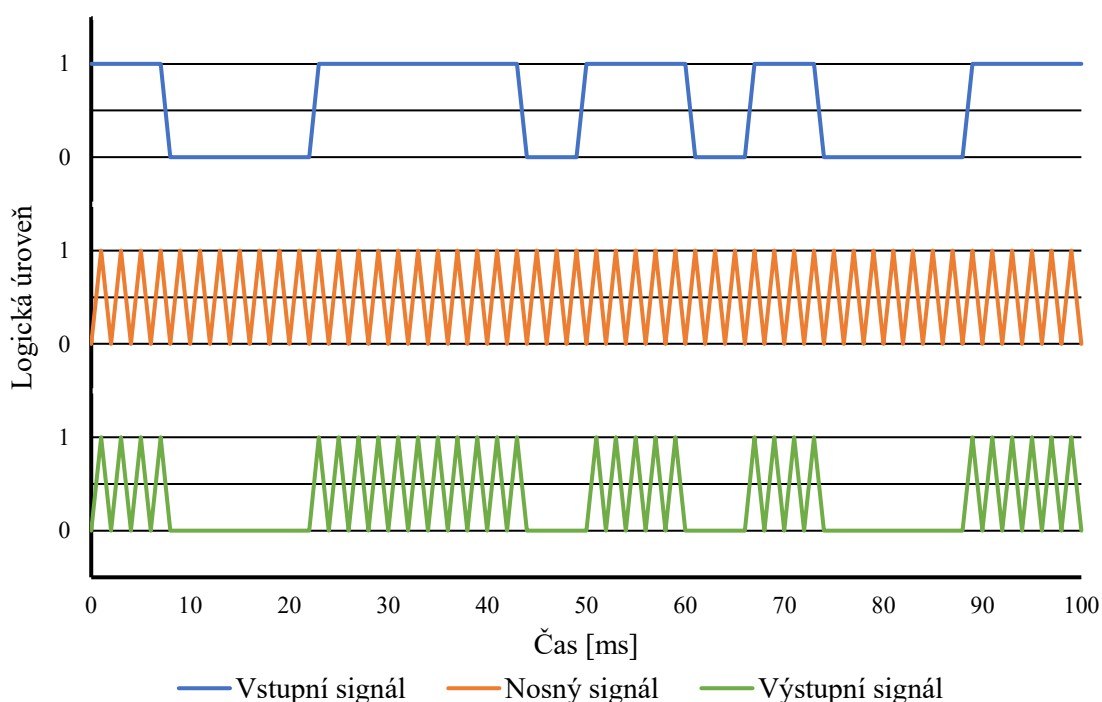
Modulace signálu

Technologie snímání přerušení infračerveného paprsku trpí problémem rušení externími zdroji infračerveného světla. Detektor infračerveného paprsku může být totiž zahlcen přirozeně se vyskytujícími, mnohem silnějšími zdroji, než je emitor použitý v daném zařízení, jako jsou například Slunce, nebo rozehráté předměty v blízkosti zařízení. Tomuto problému však lze předejít pomocí použití modulovaného signálu.

Modulace je proces, který kombinuje původní signál, který má zařízení za cíl přenést, s nosným signálem vyšší frekvence. Výsledkem tohoto procesu je modulovaný signál, který je odolnější vůči interferenci, jelikož běžné zdroje rušení nenásledují přesně definovanou frekvenci a výsledný signál je tedy od šumu a okolních signálů lépe rozeznatelný. Důležitým krokem při návrhu modulačního systému je správná volba frekvence nosného signálu, kterou je třeba zvolit tak, aby nebyla přítomna v předpokládaných zdrojích rušení.

Amplitudová modulace digitálního signálu, také známá jako „On-Off Keying,“ neboli „OOK“ [8] je nejjednodušší variantou modulace digitálního signálu, jelikož vyžaduje pouze zdroj nosného signálu a součástku (jako je například tranzistor) schopnou tento signál spínat na základě digitálního vstupního signálu. Příklad OOK lze vidět na obrázku 1.3. Díky své jednoduchosti se OOK široce využívala například v infračervených dálkových ovladačích spotřební elektroniky, ačkoli v moderních systémech je často

nahrazována složitějšími modulačními technikami (například frekvenční, nebo fázovou modulací). [9]



Obrázek 1.3 Příklad amplitudové modulace digitálního signálu, převzato z [8]

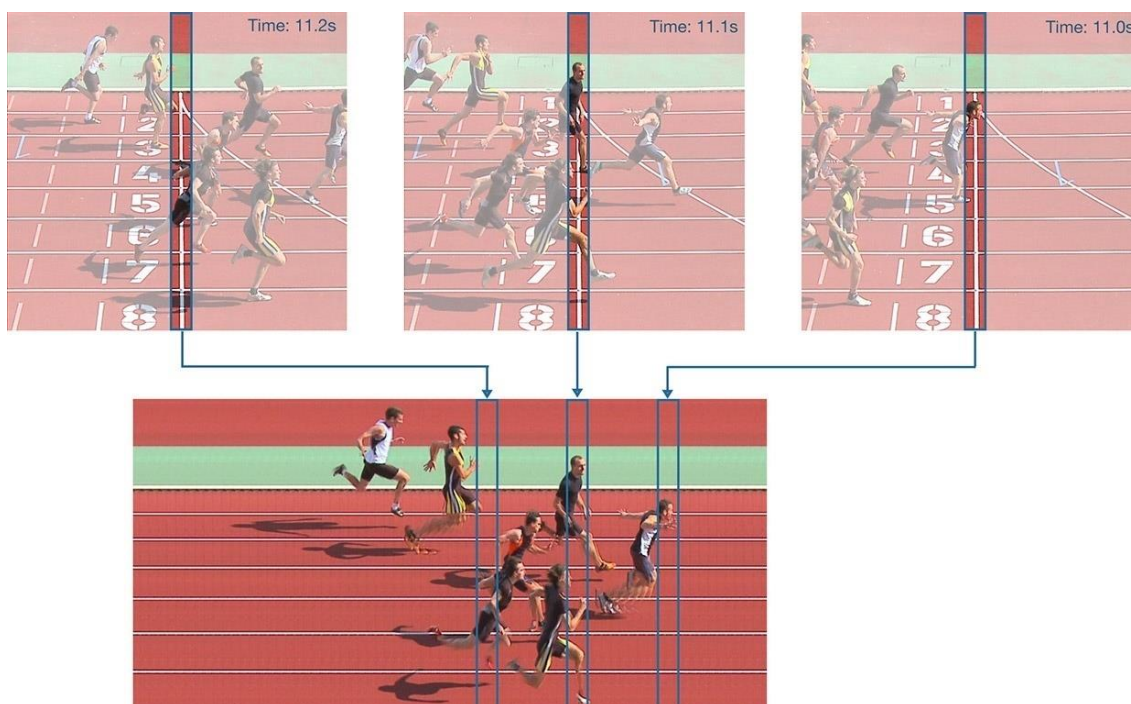
Demodulace signálu

Demodulace signálu je proces opačný k modulaci a je nezbytnou součástí jakéhokoliv systému využívajícího modulovaný signál. Jejím cílem je z modulovaného signálu opět získat původní (digitální) data, což v případě modulace typu OOK spočívá v detekci přítomnosti nosné frekvence v detekovaném signálu.

Typickým příkladem takového obvodu je infračervená fotodioda následovaná pásmovou propustí a zesilovačem, jehož výstupem je již demodulovaný signál.

1.1.5 Fotografické snímání cíle

Fotografické snímání cílové čáry je jednou z předních metod využívaných na závodech nejvyšších úrovní. Využívá vysokorychlostního páskového fotoaparátu, který na rozdíl od normálního fotoaparátu, který snímá celé zorné pole ve statický časový okamžik, snímá časově kontinuální obraz o šířce 1 pixelu. Z takto pořízené série pásek je následně sestaven výsledný obraz připomínající mírně zkreslenou klasickou fotografií.



Obrázek 1.4 Porovnání snímků klasického fotoaparátu (nahore) a páskového fotoaparátu (dole), převzato z [10]

Hlavními výhodami této technologie jsou:

- přesné zaznamenání výsledků (některé systémy přesahují 1000 snímků za sekundu),
- možnost zpětného rozlišení závodníků (rekonstruovaný obraz představuje časový záznam).

Hlavní nevýhodou technologie snímání cílové čáry pomocí páskového fotoaparátu je její vysoká pořizovací cena, která její použití umožňuje pouze na nejvyšších soutěžích. [10]

1.2 Mikrokontrolery

Mikrokontrolery představují základní stavební prvek mnoha systémů. Jedná se o integrované obvody kombinující procesorovou jednotku, paměť a vstupně-výstupní periferie do jednoho čipu. Díky svým kompaktním rozměrům a univerzálnosti jsou mikrokontrolery hojně užívány v automatizaci, měřicích přístrojích a v zařízeních internetu věcí.

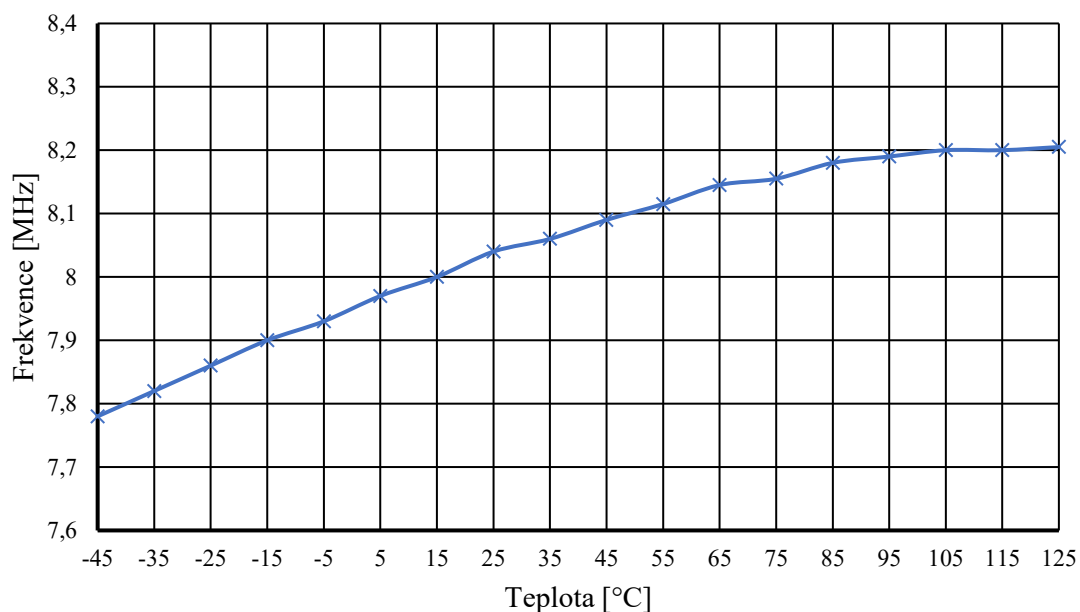
1.2.1 Mikrokontroler ATmega328p

Mezi nejrozšířenější rodiny mikrokontrolerů patří rodina AVR vyráběná firmou Microchip Technology Inc. (dříve Atmel Inc.). Oblíbenosti se tato rodina mikrokontrolerů těší především díky svému použití ve vývojových deskách Arduino, což jí propůjčuje výhody v podobě detailní dokumentace a kompatibility s vývojovým

prostředím Arduino IDE. Dalšími výhodami této rodiny mikrokontrolerů jsou nízká spotřeba energie a široká, veřejně přístupná komunita.

Přesnost zařízení

Mikrokontroler ATmega328p disponuje vnitřním zdrojem frekvence se jmenovitým kmitočtem 8MHz. Firma Microchip Technology Inc. (výrobce ATmega328p) udává v datovém listu tohoto zařízení očekávanou přesnost RC oscilátoru v závislosti na teplotě a napájecím napětí.



Obrázek 1.5 Závislost frekvence interního RC oscilátoru na teplotě při provozním napětí 5 V (data převzata z [11, s. 274])

Z obrázku 1.5 lze v očekávaném teplotním rozmezí (15–25 °C) vyčíst frekvenci interního RC oscilátoru přibližně 8,03 MHz.

1.3 Typy součástek pro osazení desky plošných spojů

Při návrhu elektrických zařízení je nezbytné zvolit vhodný typ součástek nejen z hlediska jejich elektrických vlastností, ale i z hlediska osazení výsledné desky. Finální návrh desky obsahuje kombinaci součástek s drátovými vývody (THT) a součástek pro povrchovou montáž (SMD), přičemž volba konkrétní technologie závisí na požadavcích na danou součástku.

1.3.1 Součástky s drátovými vývody (THT)

Součástky s drátovými vývody, známé jako THT (z anglického „Through Hole Technology“) jsou typem součástek, které se osazují skrz desku plošných spojů. Samotná součástka má na sobě vývody v podobě drátů, které se provlékají skrz pokovené otvory

v desce plošných spojů a následně jsou zapájeny z druhé strany. Výhodami THT provedení součástek a osazení jsou zejména mechanická odolnost spoje a jednoduchá ruční montáž, nebo demontáž pro případnou výměnu součástek. Hlavními nevýhodami součástek využívajících technologii THT jsou jejich větší rozměry a vyšší náklady na výrobu desek plošných spojů, na kterých budou použity (je třeba vrtat a pokovovat díry).

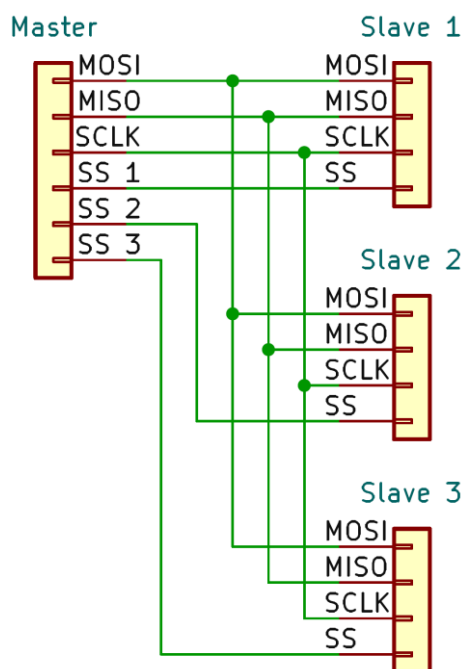
1.3.2 Součástky pro povrchovou montáž (SMD)

Součástky pro povrchovou montáž, označované jako SMD (z anglického „Surface Mount Device“) jsou modernějším typem součástek, které se na rozdíl od jejich THT provedení pájí přímo na povrch desky plošných spojů. Rozměry SMD součástek jsou často menší, než jejich THT alternativy a umožňují tak vyšší hustotu osazení na deskách plošných spojů, což může vést ke zmenšení desky. Zároveň nevyžadují vrtání a pokovování otvorů pro montáž, což dělá výrobu samotných desek levnější. Na druhou stranu je ruční montáž, nebo oprava SMD součástek náročnější a jejich spoje mají menší mechanickou pevnost.

1.4 Komunikační sběrnice

1.4.1 SPI

SPI (z anglického „Serial Peripheral Interface“) je synchronní sériové komunikační rozhraní vyvinuté společností Motorola v 80. letech 20. století umožňující obousměrnou komunikaci mezi zařízeními. Při propojení zařízení pomocí SPI vždy plní jedno zařízení řídicí funkci (tzv. „master“) zatímco ostatní periferní zařízení jsou ve funkci řízené (tzv. „slave“). [12]



Obrázek 1.6 Zapojení pro komunikaci se třemi periferními zařízeními pomocí sběrnice SPI, převzato z [12]

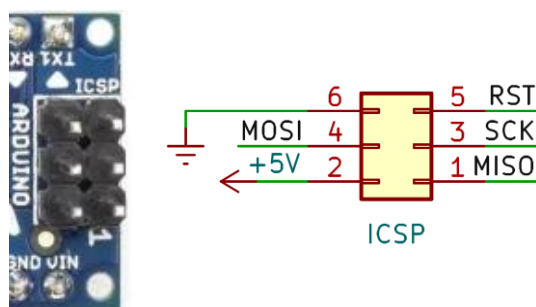
Komunikace probíhá prostřednictvím čtyř základních vodičů:

- MOSI (Master Out, Slave In) – přenáší data z řídicího zařízení do periferie,
- MISO (Master In, Slave Out) – přenáší data z periferie do řídicího zařízení,
- SCK (Serial Clock) – přenáší synchronizační hodinový signál,
- SS (Slave Select) – určuje, se kterou periferií probíhá komunikace,

jak lze vidět v příkladu zapojení na obrázku 1.6. Hlavními výhodami komunikačního protokolu SPI jsou jeho rychlost, jelikož vlastní komunikace není dělena do paketů a probíhá v obou směrech ve stejný čas, a možnost připojit více periferních zařízení k jednomu řídicímu (každé vyžaduje pouze jedno vlastní připojení pro signál SS, zatímco ostatní vodiče jsou sdílené). Hlavními nevýhodami jsou nemožnost komunikace periferních zařízení mezi sebou a omezená maximální vzdálenost. [13]

ISP pro ATMega328p

Mikrokontroler ATMega328p využitý v zařízení navrhnutém v této práci využívá komunikační protokol SPI převážně jako základ mechanismu ISP neboli „In-System Programming“. Tento mechanismus umožňuje přímý přístup k paměti mikrokontroleru pomocí programátorů, jako je například AVR-ISP MK2, což umožňuje programování mikrokontroleru i bez přítomnosti zaváděcího programu. S přihlédnutím ke kompatibilitě s existujícími programátory a systémy byl zvolen design ISP připojení shodný se systémem Arduino nano (viz. obrázek 1.7).



Obrázek 1.7 Připojení ISP na desku Arduino nano (vlevo), označení jednotlivých vývodů (vpravo), převzato z [14]

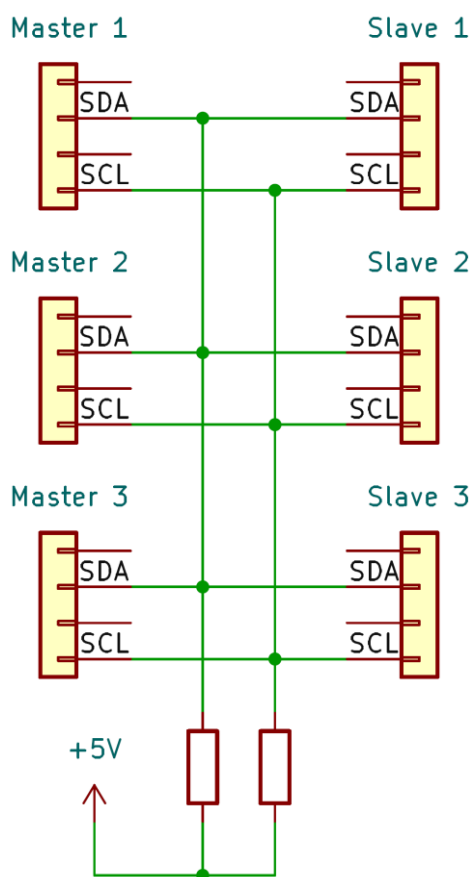
1.4.2 I2C

I2C („Inter Integrated Circuit“) je dvou vodičová synchronní komunikační sběrnice vyvinutá firmou Philips v roce 1980. Podobně jako sběrnice SPI je založena na principu řídicí – řízené (master – slave) zařízení, ale s rozdílem, že na sběrnici I2C může být připojeno více zařízení v roli řídicího zařízení. Další výhodou proti sběrnici SPI je zachování počtu vodičů při zvýšení počtu připojených zařízení, jelikož další zařízení nevyžaduje dedikovaný port pro připojení na řídicím zařízení. Sběrnice se skládá pouze ze dvou linek, a to:

- SDA (Serial Data) – přenos vlastních dat,
- SCL (Serial Clock) – přenáší hodinový signál.

Komunikace s konkrétním řízeným zařízením je řešena pomocí adresování na začátku komunikačního bloku, přičemž každé řízené zařízení disponuje unikátní sedmibitovou (či méně častou desetibitovou) adresou. [15]

Hlavními nevýhodami sběrnice I2C je poměrně malá maximální vzdálenost (způsobená potřebou společné země a poměrně nízkou maximální kapacitou, než začne docházet ke zkreslování signálů) a potřebou pull-up rezistorů na obou linkách. [16]



Obrázek 1.8 Zapojení sběrnice I2C se třemi řídicími a třemi řízenými zařízeními, převzato z [15]

1.4.3 UART

UART („Universal Asynchronous Receiver-Transmitter“) je jednoduché sériové rozhraní používané pro komunikaci mezi dvěma zařízeními. Na rozdíl od protokolů SPI či I2C se jedná o asynchronní standard (nemá společný hodinový signál), přičemž synchronizace je zajištěna předem určenou rychlostí přenosu udávanou v bitech za sekundu (známá také jako „baud rate“). UART je na každé zařízení připojeno na dvou místech, a to:

- Tx port – výstup dat ze zařízení,
- Rx port – vstup dat do zařízení,

s tím, že Tx port každého zařízení je napojen na Rx port zařízení druhého. Data se při použití standardu UART přenáší v podobě rámců vypadajících takto:

- Start bit – logická 0,
- 5–9 datových bitů – nejčastěji 8 bitů,
- Parity bit – nepovinný bit použitelný pro detekci chyb,
- 1–2 stop bity – nejčastěji 1 bit.

Hlavní výhodou sběrnice UART je její jednoduchost nevyžadující hodinový signál a vyžadující pouze dva vodiče. Nevýhodami sběrnice UART jsou:

- možnost propojení pouze dvou zařízení,
- potřeba přesného sladění rychlosti komunikace,
- potřeba přesného nastavení podoby rámce. [17]

1.5 Zaznamenání signálu mikrokontrolerem

Pro správné zaznamenání časového intervalu závodníka je velmi důležité správné a včasné zpracování vstupního signálu přivedeného na vstupní pin mikrokontroleru. Ve vlastním programu lze tyto změny zpracovat dvěma způsoby: vzorkováním, nebo přerušením.

1.5.1 Vzorkování

Prvním ze způsobů, jak lze detekovat vstupní signál je vzorkování. Nejjednodušší implementací této techniky je jednoduchá „if“ podmínka kontrolující napětí na zvoleném vstupním pinu při každém průchodu hlavní smyčkou programu.

Hlavní výhodou detekce vstupního signálu pomocí vzorkování je jednoduchost implementace v programu. Nevýhod této implementace je však několik:

- Časová neefektivnost – zpracování „if“ podmínky mikrokontrolerem zabírá cykly procesoru.
- Zpožděná reakce – „if“ podmínka je zpracována vždy na stejném místě programu. Pokud dojde ke změně vstupního signálu mimo toto místo, musí mikrokontroler dokončit zbytek programového cyklu, než se opět dostane k podmínce, což vede k nekonzistentnímu času mezi změnou signálu a jejím vyhodnocením.

1.5.2 Přerušování

Přerušování je druhým ze způsobů, jak lze změnu vstupního signálu detekovat. Při zaznamenání přerušování mikrokontroler přerušuje exekuci kódu, uloží svoji pozici v programu do paměti, a provede rutinu obsluhu přerušování (anglicky „Interrupt Service Routine“, neboli „ISR“). Po dokončení kódu v ISR načte mikrokontroler svoji předchozí pozici v programu a pokračuje v jeho provedení. Hlavní výhodou použití přerušování je velmi nízká časová prodleva mezi změnou signálu na vstupním vývodu a její zpracování programem, díky tomu, že se mikrokontroler začne věnovat vyřízení ISR téměř okamžitě. Díky této výhodě je zpracování vstupních signálů pomocí přerušování vhodné u časově citlivých využití, jako je například detekce přerušování paprsku.

Hlavní problém, na který lze narazit při použití přerušování je cyklení přerušování. Pokud by totiž došlo k opětovnému vyvolání přerušování v době, kdy mikrokontroler zpracovává kód v ISR, opět by se tato pozice (v kódu ISR) uložila do paměti a začal by se zpracovávat kód v ISR od jeho začátku. Následně by se po dokončení druhé ISR mikrokontroler

nevrátil do původního kódu, ale zpět do kódu první ISR, a to pouze za předpokladu, že by provedení druhé ISR nebylo znovu přerušeno. Takto může snadno dojít k přetečení paměti, kterou mikrokontroler používá k uložení pozice v kódu, ze které začíná přerušování, a tím pádem selhání programu. Tomuto problému lze předejít deaktivováním přerušování v době vyřizování ISR a opětovnou aktivací přerušování po jejím dokončení. V kódu použitého programu tohoto bylo dosaženo pomocí maskování podmínkou „AND“ registru pro externí přerušování ihned po zahájení ISR:

```
ISR(INT0_vect) {  
    EIMSK = EIMSK & 0b11111110;           // vypnutí interruptu  
    ...  
},
```

a jeho následným aktivováním pomocí maskování podmínkou „OR“:

```
...  
EIMSK = EIMSK | 0b00000001;           // zapnutí interruptu  
...
```

Mikrokontroler ATmega328p disponuje třemi generalizovanými (signál splňující podmínku na kterémkoliv ze setu vývodů vyvolá přerušování) a dvěma konkrétními (externími) zdroji přerušování na vstupních vývodech. Vzhledem k potřebě pouze jednoho zdroje přerušování byl zvolen externí zdroj přerušování INT0 s detekcí vzestupné hrany.

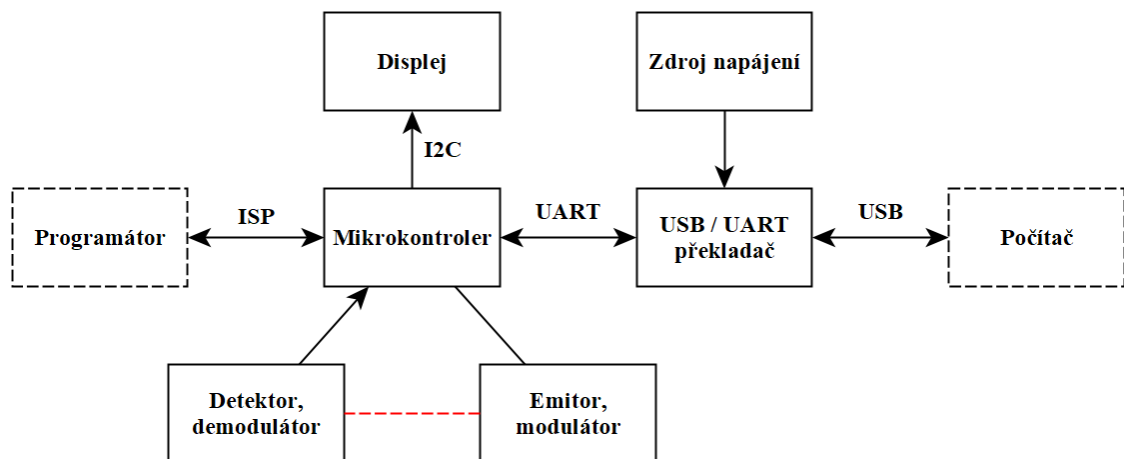
2 NÁVRH A REALIZACE ZAŘÍZENÍ

Tato kapitola se věnuje návrhu a realizaci zařízení pro měření času robotického závodníka. Jejím cílem je představit a rozebrat jednotlivé kroky vedoucí k sestavení finálního zařízení, včetně jeho testování.

2.1 Funkční princip

Pro detekci překročení cílové čáry byla zvolena technologie snímání přerušení paprsku s modulací vysílaného paprsku. Tento princip detekce představuje kompromis mezi přesností měření a cenou výsledného zařízení (viz. kapitola 1.1.4).

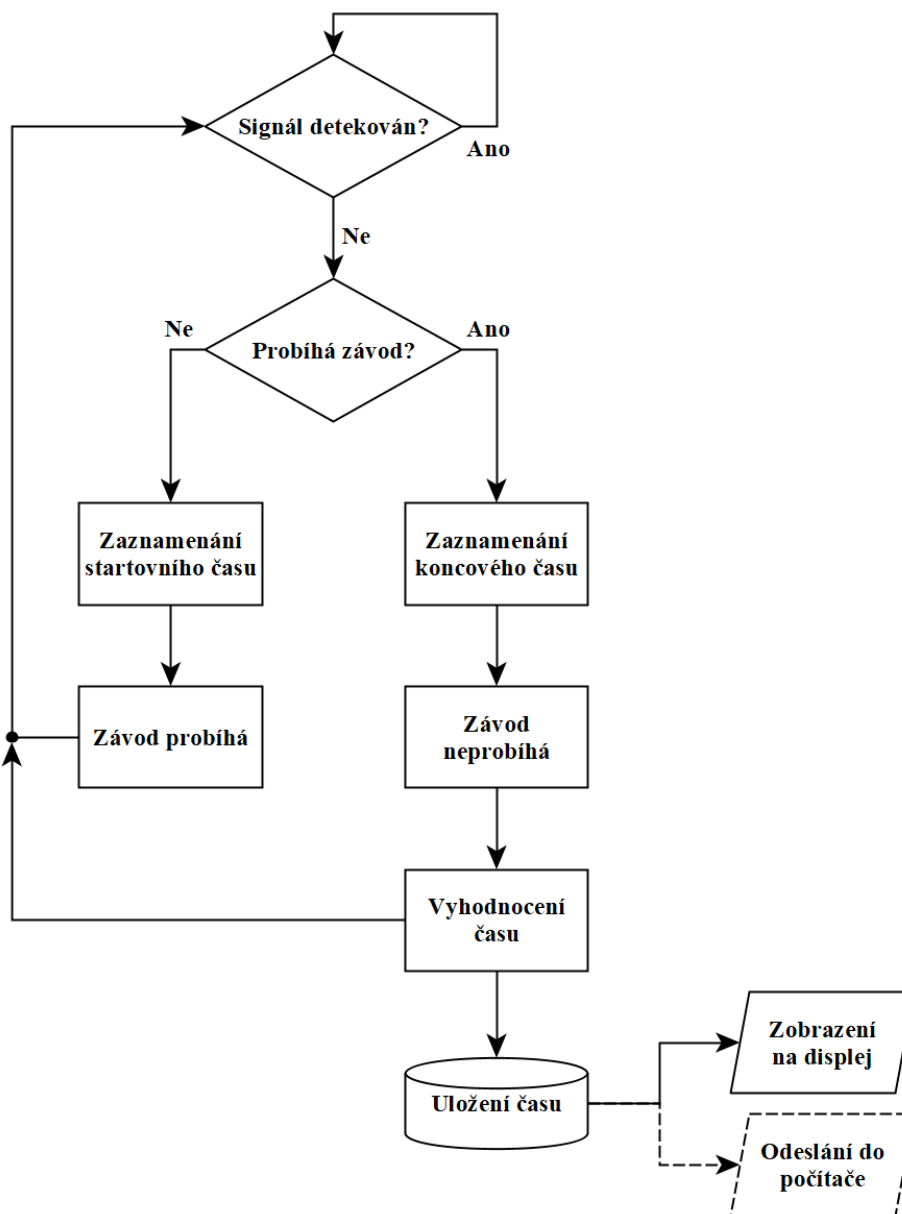
Blokové schéma na obrázku 2.1 znázorňuje strukturu navrženého zařízení pro měření času. Centrálním komponentem celého systému je mikrokontroler, který zajišťuje zpracování signálů, výpočet finálních časů, řízení periférií a komunikaci s ostatními komponenty. Zařízení je napájeno centrálně z portu USB-B a propojení jednotlivých desek je zajištěno konektory typu RJ-11 (tento typ konektorů byl zvolen především kvůli dostupnosti náhradních dílů a kabelů). Pro účely programování je zahrnuto rozhraní SPI využívající sběrnice ISP. Vyhodnocené časy jsou mikrokontrolerem odesílány jak na displej (pomocí sběrnice I2C), tak do počítače, je-li připojen (pomocí překladače UART / USB). Přerušovaná červená čára v blokovém schéma znázorňuje paprsek v infračerveném spektru, jehož přerušování je vyhodnocováno mikrokontrolerem.



Obrázek 2.1 Blokové schéma návrhu finálního zařízení s možností připojení počítače nebo programátoru

Na obrázku 2.2 se nachází vývojový diagram popisující operační logiku zařízení. Celý proces je založen na detekci přerušování infračerveného paprsku, což značí průjezd závodníka časovací bránou. Při detekci přerušování paprsku nejprve zařízení ověří, zda probíhá závod. Pokud závod neprobíhá, je zaznamenán startovní čas a hodnota indikující započatý závod v paměti je přepsána (nyní indikuje, že závod probíhá).

Pokud mikrokontroler vyhodnotí, že závod probíhá, je aktuální čas zaznamenán jako koncový, čímž se měření ukončí (a hodnota indikující započatý závod se přepíše do původního stavu). Následně proběhne vyhodnocení celkového trvání závodu a tato hodnota je uložena do paměti programu. Výsledný čas je poté zobrazen na displeji a odeslán pomocí USB do počítače, je-li připojen. Celý proces je navržen tak, aby byl plně automatický a nepovoloval lidský zásah do procesu měření.



Obrázek 2.2 Vývojový diagram algoritmu finálního zařízení s možností odeslání naměřených dat do počítače

2.2 Návrh desky plošných spojů

2.2.1 Zapojení LED a jejich napájení

Elektroluminiscenční diody jsou polovodičové součástky vyzařující světlo při průchodu elektrického proudu v propustném směru. Díky své jednoduchosti, nízké spotřebě a dlouhé životnosti se často využívají jako indikační prvky elektronických zařízení.

LED vykazují nelineární voltampérovou charakteristiku, což znamená, že po dosažení určitého prahového napětí (závislé na barvě a typu LED) prudce vzroste protékající proud (příklad lze vidět v 1. kvadrantu obrázku 1.2). Aby nedošlo k tepelnému poškození (případně zničení) LED, je potřeba do zapojení přidat ochranný rezistor limitující maximální proud procházející diodou.

Minimální hodnotu ochranného rezistoru lze vypočítat pomocí rovnice 2.1:

$$R_{min} = \frac{U_{nap} - U_f}{I_{max}}, \quad (2.1)$$

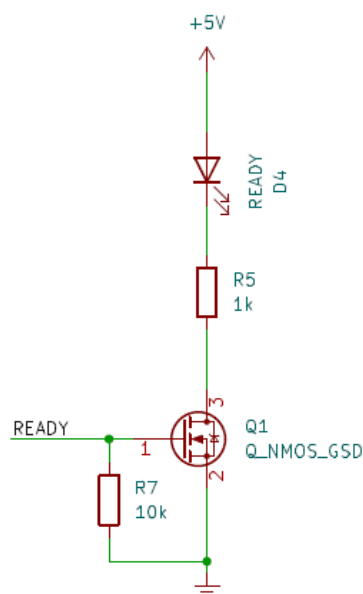
kde U_{nap} je napájecí napětí systému, U_f je úbytek napětí v propustném směru LED a I_{max} je maximální proud procházející diodou. Na základě rovnice 2.1 a dat vyčtených z datových listů jednotlivých LED byly vypočteny minimální hodnoty odporů ochranných rezistorů, které jsou uvedeny v tabulce 2.1

Tabulka 2.1 Vypočtené hodnoty minimálních odporů ochranných rezistorů dle hodnot převzatých z datových listů použitých LED a rovnice 2.1

typ LED	červená	zelená	modrá	bílá	infračervená
U_f [V]	2	3,3	3,2	2,8	1,5
I_{max} [mA]	30	30	20	25	100
R_{min} [Ω]	100	56,7	90	88	35

Pokud je zvolena vyšší hodnota odporu v zapojení než vypočtená hodnota R_{min} , bude LED vyzařovat světlo s nižší intenzitou. Po vizuálním vyhodnocení jasu jednotlivých typů LED při testování byla zvolena hodnota odporu všech ochranných rezistorů 1000 Ω .

Pro spínání jednotlivých LED na základě výstupních signálů mikrokontroleru byl vybrán unipolární tranzistor typu NMOS, konkrétně Si2302CDS od společnosti Vishay Semiconductors Inc. Tento tranzistor povoluje průchod proudu mezi zdrojem a odvodem (kontakty označené čísly 3 a 2 na obrázku 2.3) je-li na hradlo (označeno číslem 1 obrázku 2.3) přivedeno napětí větší než 0,4 V. [18] Vzhledem k absenci pull-down rezistorů na digitálních výstupech mikrokontroleru ATmega328p byl do zapojení přidán externí pull-down rezistor (označen jako R7 na obrázku 2.3) zajišťující správné rozepnutí obvodu, není-li požadováno svícení konkrétní LED.



Obrázek 2.3 Schéma zapojení indikační LED s ochranným rezistorem, spínacím tranzistorem a pull-down rezistorem zajišťujícím rozepnutí obvodu

2.2.2 Hlavní vyhodnocovací deska

ATMega328p

Jako centrální vyhodnocovací čip byl zvolen mikrokontroler ATMega328p. K volbě tohoto konkrétního mikrokontroleru vedla především předchozí zkušenost autora s tímto mikrokontrolerem a jeho kompatibilita s vývojovým prostředím Arduino IDE.

Tabulka 2.2 Základní technické parametry mikrokontroleru ATMega328p, převzato z [11, s. 1–2]

Architektura	8bitová AVR RISC
Frekvence procesoru	0,4–16 MHz
FLASH paměť	32 kB
SRAM paměť	2 kB
EEPROM paměť	1 kB
Podporované komunikační protokoly	I2C, UART, SPI
Napájecí napětí	2,7–5,5 V

Na základě technických parametrů mikrokontroleru uvedených v tabulce 2.2 bylo pro napájení navrhovaného zařízení zvoleno napětí 5 V, které umožňuje přímé napájení prostřednictvím rozhraní USB bez nutnosti dalších úprav nebo regulace napětí. Jako zdroj hodinového signálu mikrokontroleru byl zvolen interní RC oscilátor s frekvencí 8 MHz. Tato volba představuje vhodný kompromis mezi dostatečnou výpočetní rychlostí a jednoduchostí návrhu, jelikož nevyžaduje žádné externí komponenty.

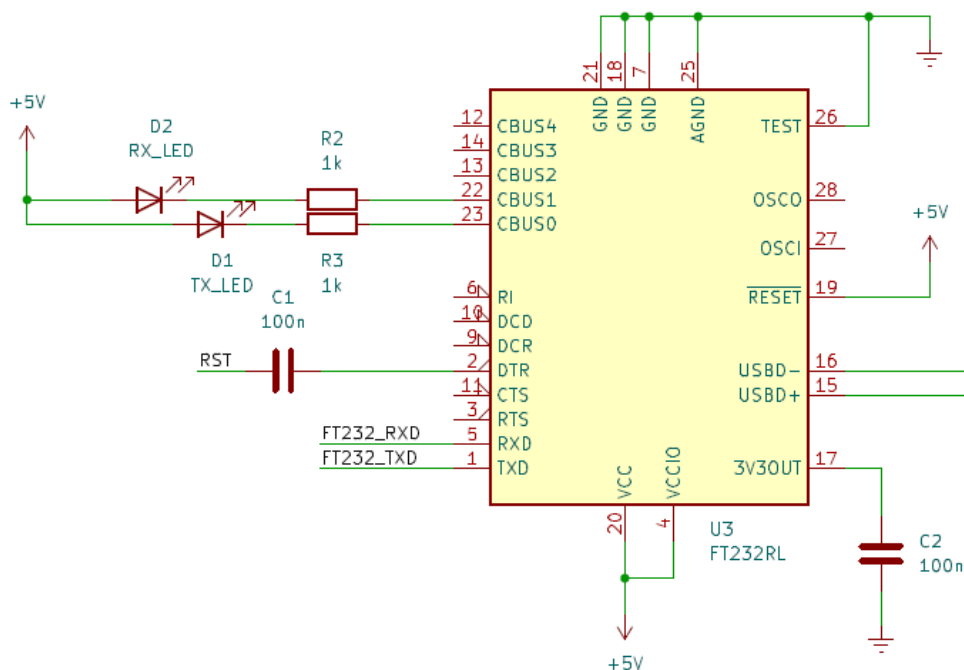
FT232RL

Pro zajištění komunikace mezi počítačem a použitým mikrokontrolerem byl zvolen integrovaný obvod FT232RL od společnosti FTDI. Tento obvod slouží jako převodník rozhraní USB na UART, čímž zajišťuje kompatibilitu s moderními zařízeními.

Ve výsledném návrhu je FT232RL zapojen tak, aby umožňoval obousměrnou datovou komunikaci přes virtuální sériový port, zejména tedy přenos naměřených dat do počítače a nahrávání firmwaru do paměti mikrokontroleru.

Pro zajištění automatického resetu mikrokontroleru při inicializaci spojení s počítačem byl mezi vývod DTR (Data Terminal Ready) čipu FT232RL a vývod $\overline{\text{RESET}}$ mikrokontroleru (označený jako RST na obrázku 2.4) přidán kondenzátor o kapacitě 100 nF. Tento kondenzátor zajišťuje krátký impuls na resetovací vstup mikrokontroleru při navázání spojení, čímž se spustí bootloader mikrokontroleru a umožní tak nahrání nového firmwaru pomocí rozhraní USB.

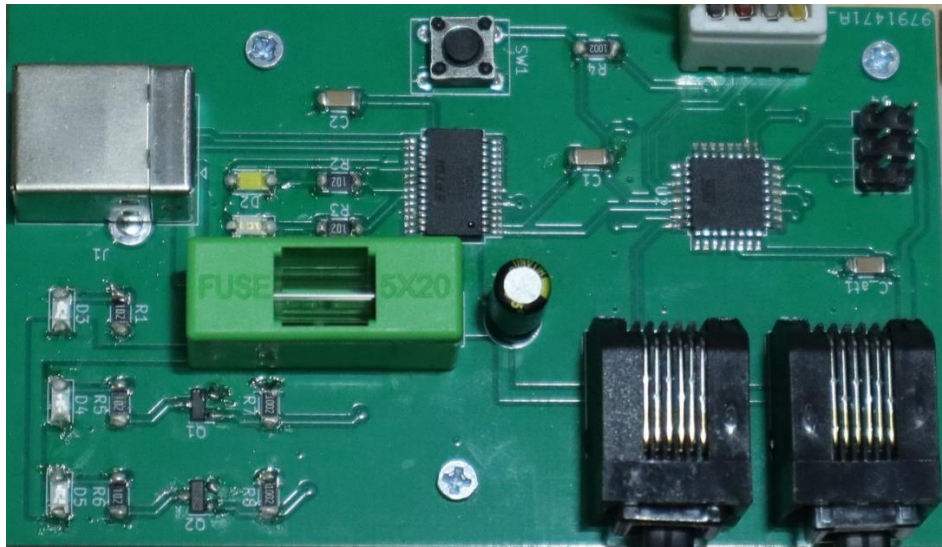
Dále byly k čipu FT232RL připojeny dvě elektroluminiscenční diody ve funkci indikátorů probíhající sériové komunikace. Každá z těchto diod je opatřena příslušným ochranným rezistorem limitujícím maximální procházející proud (viz. kapitola 2.2.1).



Obrázek 2.4 Schéma zapojení integrovaného obvodu FT232RL jako převodníku rozhraní USB na UART

Na obrázku 2.5 je zachycena zkompletovaná a osazená hlavní vyhodnocovací deska. V levé horní části desky se nachází konektor USB-B, který slouží k napájení zařízení a umožňuje případné připojení k osobnímu počítači. V pravé horní části je umístěn mikrokontroler ATmega328p, konektor propojující hlavní desku s displejem zařízení pomocí sběrnice I2C a rozhraní SPI ve funkci ISP (viz. kapitola 1.4.1). V pravé dolní

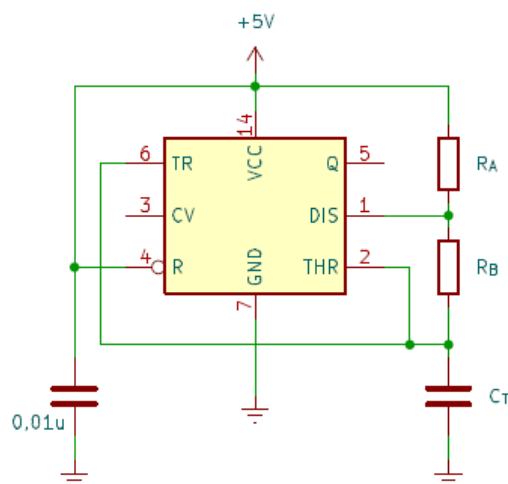
části se nachází konektory typu RJ-11, které zajišťují spojení s deskami emitoru a detektoru.



Obrázek 2.5 Osazená hlavní deska plošných spojů s mikrokontrolerem ATmega328p, komunikačními rozhraními (USB, RJ-11, I2C) a USB – UART převodníkem

2.2.3 Modulátor a emitor

Pro generování nosného signálu využívaného při modulaci infračerveného paprsku byl zvolen časovací obvod NE555 od společnosti Texas Instruments Inc. pracující v astabilním režimu, ve kterém generuje periodický signál ve tvaru čtvercové vlny o frekvenci přibližně 38 kHz. Tato frekvence byla zvolena s ohledem na běžně dostupné infračervené přijímače, které jsou na tuto frekvenci citlivé.



Obrázek 2.6 Typické zapojení časovače Ti NE555 v astabilním módu, převzato z [19, s. 9]

Z datového listu poskytovaného výrobcem byly převzaty následující rovnice udávající střídu (rovnice 2.2) a periodu (rovnice 2.3) výstupní čtvercové vlny, rovnice převzaty z [19, s. 9]:

$$\frac{t_H}{T} \cong \frac{R_A + R_B}{R_A + 2R_B}, \quad (2.2)$$

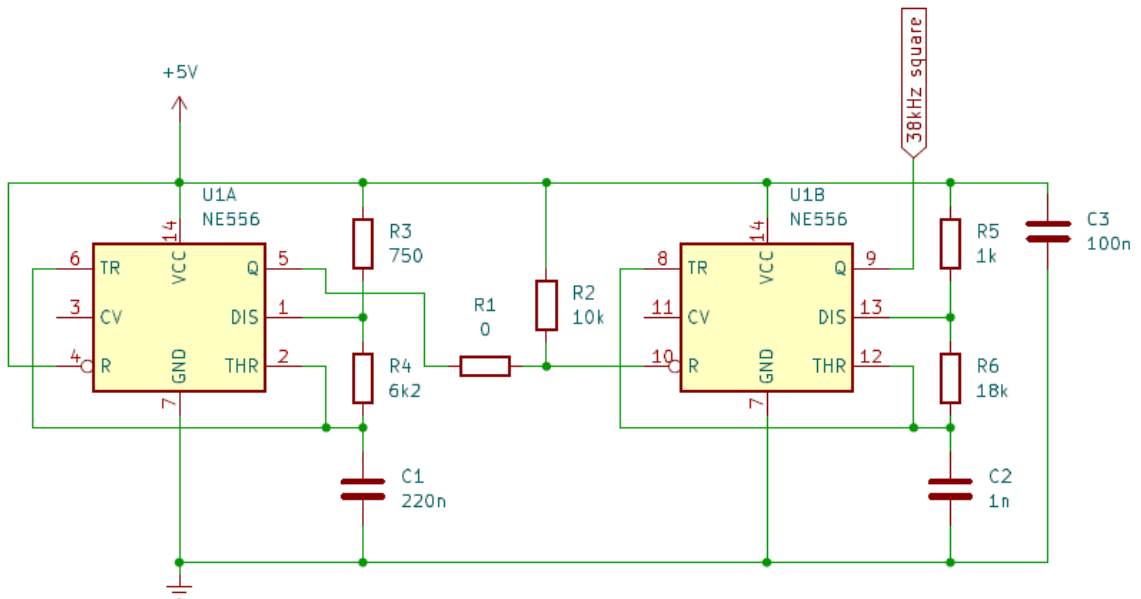
$$T \cong 0,693 \cdot C_T \cdot (R_A + 2R_B), \quad (2.3)$$

z těchto rovnic lze získat hodnoty odporů rezistorů R_A , R_B a kapacitu kondenzátoru C_T , potřebné pro výstupní vlnu o frekvenci blízké 38 kHz (detailní výpočet se nachází v příloze A).

Tabulka 2.3 Hodnoty pasivních součástek pro generátor nosného signálu modulace s frekvencí blízkou 38 kHz vypočtených dle rovnic 2.2 a 2.3

R_A [Ω]	R_B [Ω]	C_T [nF]	f [kHz]	střída [%]
1000	18000	1	39	51,4

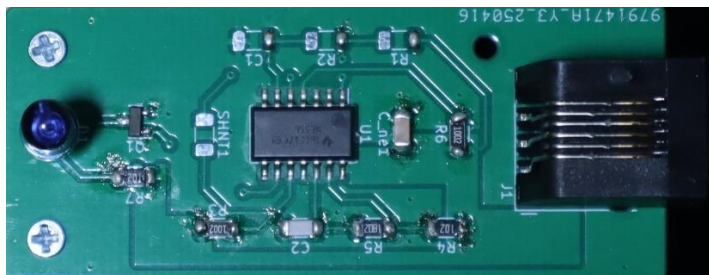
Na základě hodnot z tabulky 2.3 a referenčního zapojení z datového listu (obrázek 2.6) byl v programu KiCad navržen výsledný obvod, jehož schéma se nachází na obrázku 2.7.



Obrázek 2.7 Schéma zapojení časovače Ti NE556 pro generování nosné vlny modulace o frekvenci blízké 38 kHz

Jako emitor byla zvolena dioda TSAL6200 od společnosti Vishay Semiconductors Inc. pracující na vlnové délce 940 nm, což je vlnová délka shodná s citlivostí zvoleného přijímače (viz. kapitola 2.2.4). Emitorová LED byla zapojena dle principu popsaném v kapitole 2.2.1 se signálovou (modulační) vlnou o frekvenci 38 kHz (viz. výstupní signál označený „38kHz square“ na obrázku 2.7) přivedenou na hradlo řídicího tranzistoru.

Na obrázku 2.8 je zobrazena osazená deska plošných spojů s časovacím obvodem Ti NE556, který v astabilním režimu generuje nosnou modulační vlnu. V levé části desky se nachází infračervená dioda TSAL6200 spínaná pomocí tranzistoru řízeného výstupem časovacího obvodu. Pravá část desky obsahuje konektor typu RJ-11, prostřednictvím kterého je zajištěno napájení a propojení se společnou zemí z hlavní vyhodnocovací desky.



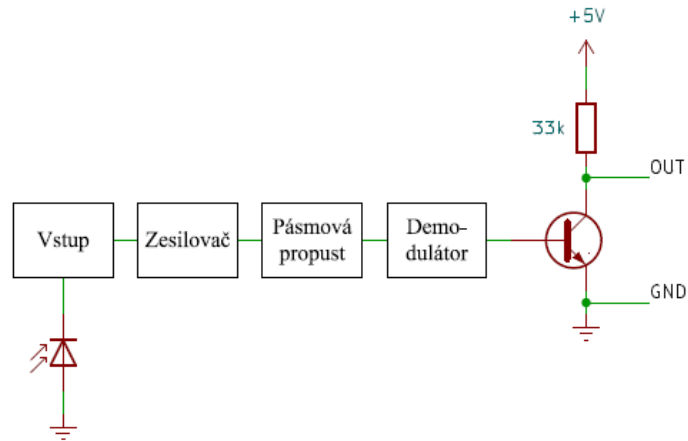
Obrázek 2.8 Osazená deska plošných spojů s časovacím obvodem Ti NE556 generujícím nosnou modulační vlnu, emitorem a konektorem RJ-11

2.2.4 Detektor a demodulátor

Pro účel detekce modulovaného infračerveného signálu byl zvolen integrovaný přijímač a demodulátor TSSP4038 od společnosti Vishay Semiconductors Inc., který je navržen k detekci signálů modulovaných na frekvenci 38 kHz.

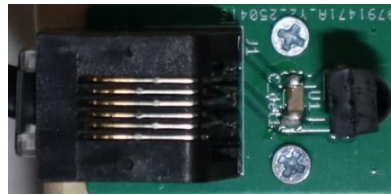
TSSP4038 kombinuje infračervenou fotodiodu (fotodiodu citlivou na vlnovou délku 940 nm), zesilovač signálu, pásmovou propust a demodulátor do jednoho pouzdra, čímž značně ulehčuje designový proces. Díky implementaci pásmové propusti a demodulátoru je detektor schopen rozlišit signál od šumu způsobeného rušivými zdroji infračerveného záření v okolí (například Slunce).

Výstupní logika integrovaného přijímače je inverzní (viz. obrázek 2.9): je-li detekován modulovaný signál, tranzistor oddělující výstupní vývod a společnou zem je sepnut, což má za následek hodnotu napětí na výstupním vývodu blízkou 0 V. Pokud signál detekován není, tranzistor zůstává v rozepnutém stavu, což v kombinaci s integrovaným pull-up rezistorem způsobí že hodnota napětí na výstupním vývodu je blízká napájecímu napětí (zde 5 V).



Obrázek 2.9 Blokové schéma detektoru a demodulátoru TSSP4038, převzato z [20, s. 1]

Na obrázku 2.10 je zobrazena osazená detektorová deska plošných spojů. V pravé části desky je umístěn detektor TSSP4038 s integrovaným demodulátorem, citlivý na frekvenci 38 kHz. V levé části desky se nachází konektor typu RJ-11 zajišťující napájení, společnou zem a přenos výstupního signálu detektoru. Pro zajištění stabilního napájecího napětí byl do zapojení doplněn filtrační kondenzátor o kapacitě 100 nF.



Obrázek 2.10 Osazená deska plošných spojů s detektorem, demodulátorem TSSP4038 a konektorem RJ-11

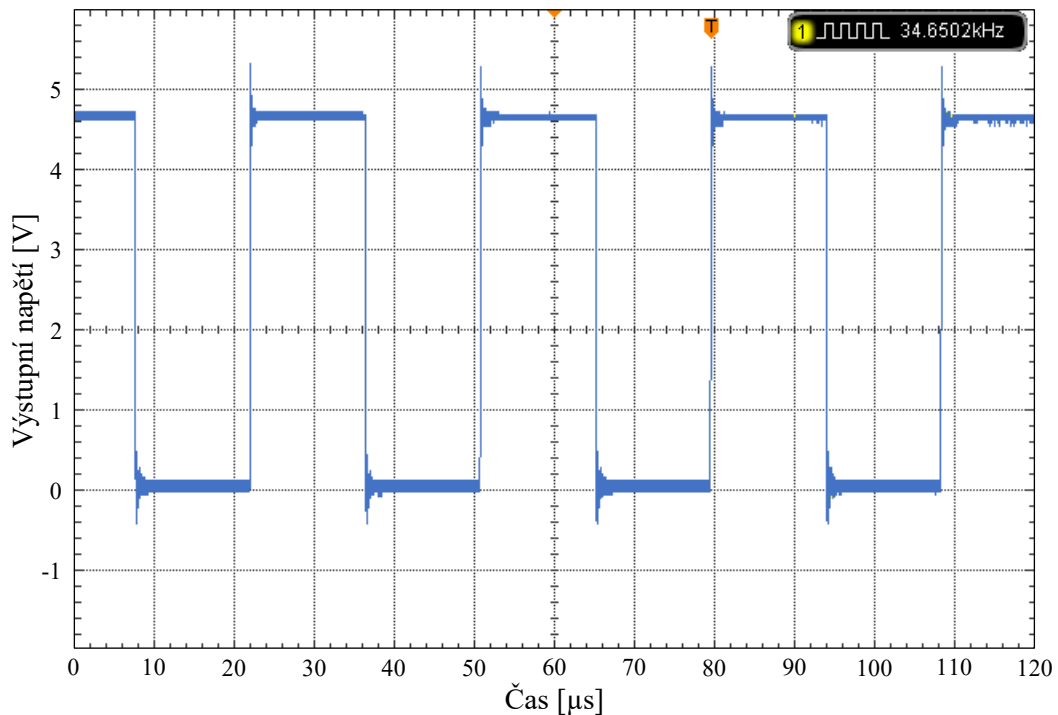
2.3 Testování zařízení

Tato kapitola se zabývá testováním funkčnosti a přesnosti navrženého zařízení. Cílem testování bylo především ověřit spolehlivost detekce průjezdů, přesnost naměřených časů a stabilitu provozu v reálných podmínkách.

2.3.1 Nepřesnost frekvence modulační vlny

Při testování zařízení byl pomocí osciloskopu Rigol MSO1074z zaznamenán průběh výstupního napětí časovacího obvodu, jehož zapojení je popsáno v kapitole 2.2.3. Výsledný průběh lze vidět na obrázku 2.11. Naměřená frekvence výstupní čtvercové vlny činila 34,65 kHz, což se liší jak od ideální cílové hodnoty 38 kHz, tak od teoreticky vypočtené hodnoty 39 kHz uvedené v tabulce 2.3. Tuto odchylku lze s největší pravděpodobností přičíst výrobním tolerancím použitých pasivních součástek (rezistorů a kondenzátorů), které mohou mít vliv na přesnost výsledné frekvence.

Navzdory zjištěné odchylce ve frekvenci modulační nosné vlny byl detektor s integrovaným demodulátorem schopen spolehlivě rozeznat modulovaný infračervený signál od náhodných rušivých signálů, a to až do vzdálenosti jednoho metru.



Obrázek 2.11 Průběh výstupního napětí z obvodu s Ti NE556 generujícího nosnou vlnu pro modulaci, zaznamenáno pomocí osciloskopu Rigol MSO1074z

2.3.2 Dvojité zaznamenání

Při neznámé konstrukci robotického závodníka může dojít ke dvojitému přerušení paprsku detekčního mechanismu při jednom projetí detekční branou, což by mělo za následek nezměření vlastního času trvání závodu a zobrazení chybného, téměř nulového času. Při testování zařízení bylo zjištěno, že problematický časový interval je přibližně jedna sekunda po načtení prvního přerušení. Z tohoto důvodu lze problém dvojitého záznamu vyřešit jednoduše ignorováním jakékoliv další detekce průjezdu po dobu přibližně jedné sekundy.

2.3.3 Korekce nepřesnosti zařízení

Vzhledem k očekávané nepřesnosti interního zdroje frekvence (viz. kapitola 1.2.1) byla provedena korekce v programu zařízení. Pro narůstající časové intervaly bylo při teplotě 20 °C provedeno měření na zařízení (spuštěno i ukončeno přerušením paprsku) a na mobilním telefonu. Následně byl určen koeficient korekce, který byl následnými měřeními iterativně zpřesňován. Koeficient korekce c byl pro každé měření spočítán dle rovnice:

$$c = \frac{t_{reálný}}{t_{zařízení}}, \quad (2.4)$$

kde $t_{reálný}$ a $t_{zařízení}$ jsou časy naměřené na mobilním telefonu a na zařízení v sekundách. Výsledný koeficient korekce byl následně vypočten dle rovnice:

$$c_{výsledný\ n} = c_{výsledný\ n-1} \cdot c_n, \quad (2.5)$$

kde n zastupuje číslo měření. Finální koeficient korekce ($c_{výsledný}$ 5. měření v tabulce 2.4) byl zakomponován do kódu jako násobič naměřeného času před jeho zpracováním do výstupního tvaru.

Tabulka 2.4 Iterativní zpřesňování výsledného koeficientu korekce pro narůstající časové intervaly

číslo měření	1	2	3	4	5	6
$t_{reálný}$ [s]	600	600,1	1800	5582	9000	9000
$t_{zařízení}$ [s]	593	599,9	1802	5581	8997	9002
c [-]	1,01180	1,00033	0,99889	1,00018	1,00033	0,99978
$c_{výsledný}$ [-]	1,01180	1,01214	1,01102	1,01120	1,01154	1,01131

Díky korekčnímu koeficientu bylo možné dosáhnout odchylky zařízení menší než $\pm 0,2\%$ v běžném teplotním rozsahu, což je pro danou aplikaci dostačující. Při extrémnějších teplotních podmínkách provozu je však určena korekce RC oscilátoru neplatná, jelikož výsledný korekční koeficient je, stejně jako RC oscilátor samotný, závislý na teplotě.

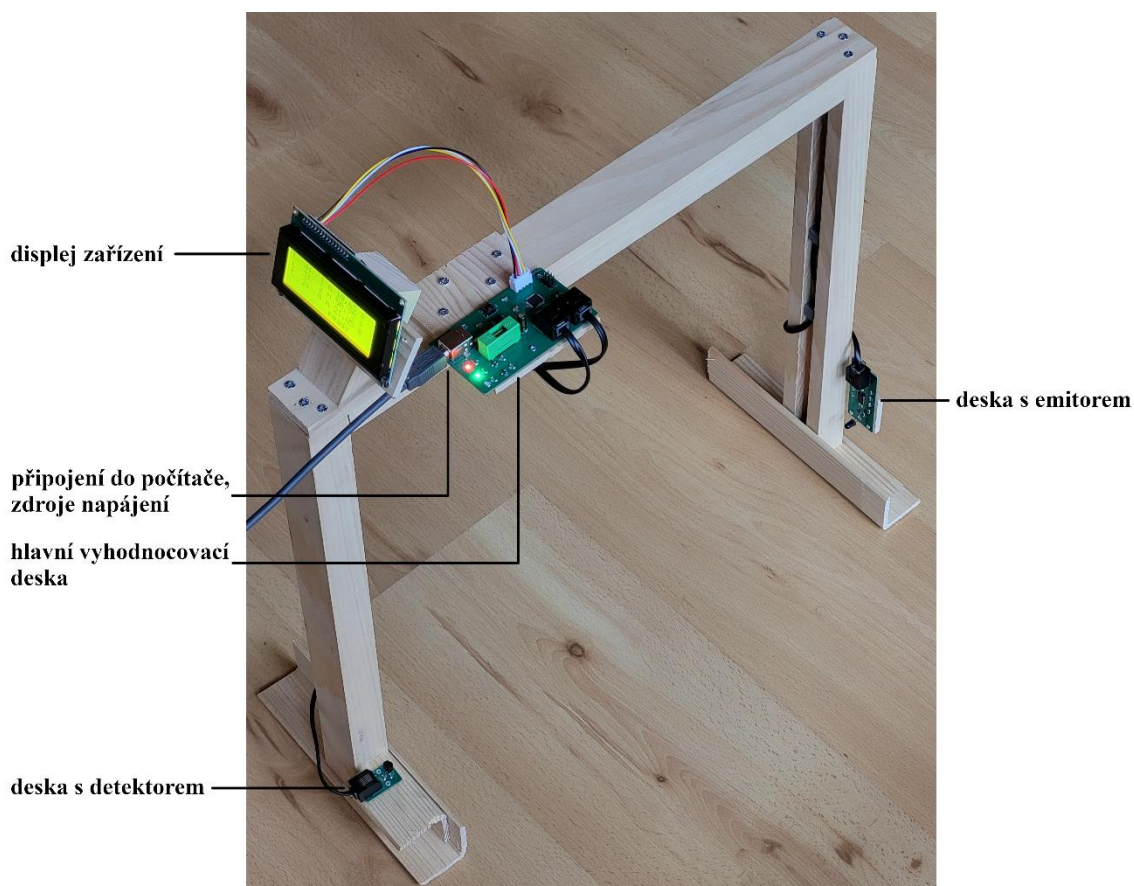
3 POPIS ZAŘÍZENÍ

Tato kapitola obsahuje popis výsledného zařízení a pojednává o jeho přesnosti. Ve třetí části kapitoly se nachází návod k použití zařízení, a to jak v samostatném režimu, tak v režimu s připojením do PC.

3.1 Popis zařízení

Na obrázku 3.1 se nachází zařízení finální časovací brány s popisem jednotlivých komponent. V levé horní části se nachází čtyřřádkový displej s dvaceti znaky na řádek, který komunikuje s hlavní deskou zařízení prostřednictvím sběrnice I2C. Hlavní vyhodnocovací deska obsahující mikrokontroler ATmega328p a port USB-B zajišťující napájení a volitelné připojení do počítače se nachází vpravo od něj.

V levé spodní části konstrukce je umístěna deska s detektorem a demodulátorem, zatímco deska s emitorem a modulátorem se nachází v pravé spodní části ve stejné výškové úrovni. Konstrukce finální časovací brány má vnitřní rozměry 40 na 40 cm, což umožňuje bezproblémový průjezd i rozměrnějším soutěžním robotům. Jako konstrukční materiál bylo zvoleno dřevo, a to především z důvodu jeho schopnosti pohlcovat infračervené záření, neboť tato schopnost minimalizuje nežádoucí odrazy schopné negativně ovlivnit spolehlivost detekce přerušení paprsku.



Obrázek 3.1 Hotové zařízení časovací brány

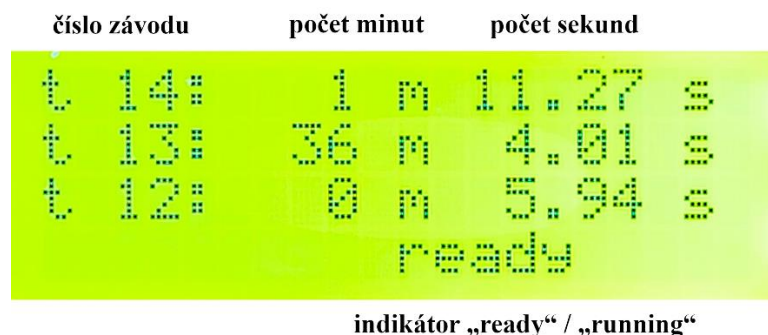
Na obrázku 3.2 lze vidět detailní popis displeje zařízení. Displej zobrazuje zaznamenané časy v jednoduše čitelném formátu:

- číslo závodu (při spuštění zařízení začíná od čísla 1),
- čas závodu v minutách,
- čas závodu v sekundách s přesností na desetiny sekund.

První řádek displeje je vyhrazen pro poslední naměřený čas, zatímco jeho druhý a třetí řádek cyklicky zobrazují ostatní, dříve zaznamenané časy.

V pravém spodním rohu displeje je zobrazován stav zařízení:

- ready – zařízení je připraveno k dalšímu měření,
- running – zrovna probíhá měření času závodu, který bude ukončen dalším průjezdem závodníka.



Obrázek 3.2 Popis LCD displeje zařízení

3.2 Funkce samostatně

Zařízení bylo navrženo tak, aby mohlo fungovat samostatně, pouze s externím zdrojem napájení. Vzhledem k tomu, že je napájení všech desek distribuováno z hlavního portu USB-B a maximální odebíraný proud nepřesahuje 85 mA (měřeno přímo na vstupu zařízení), lze použít jakýkoliv vhodný zdroj poskytující nepřerušovaných 5 V (např. nabíječka na telefon, externí akumulátorový zdroj apod.).

Po připojení vhodného zdroje se zařízení samo zapne a inicializuje. V momentě, kdy se na displeji zařízení zobrazí text „ready“ (viz. obrázek 3.2) je zařízení připraveno k měření času prvního závodníka.

Limitace

Hlavními limitacemi výsledného zařízení použitého bez připojení do počítače jsou nemožnost dlouhodobého uložení dat, okamžitá ztráta dat při restartu zařízení (nebo ztrátě napájení) a možnost zobrazení pouze tří z naměřených časů najednou.

3.3 Funkce při připojení do počítače

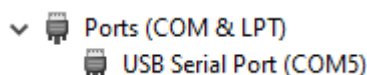
Zařízení umožňuje komunikaci s osobním počítačem pomocí sběrnice USB, který umožňuje překládání ze sériové komunikace na protokol USB kompatibilní s moderními zařízeními. Při připojení do kompatibilního USB konektoru je zařízení zároveň napájeno z PC, čímž odpadá nutnost použití externího zdroje napájení.

Čip FT232RL, po nainstalování správných ovladačů dostupných ze stránek výrobce FTDI, emuluje připojený kanál sériové komunikace s nastavenou přenosovou rychlostí 9600 bitů za sekundu (výchozí nastavení sériové komunikační rychlosti ovladačů FTDI pro operační systémy Windows 10 a Windows 11). [21]

3.3.1 Ukládání dat

Ukládání dat vystupujících ze zařízení je možné pomocí volně dostupných terminálů sériové komunikace. Pro tento projekt byl zvolen program CoolTerm. [22]

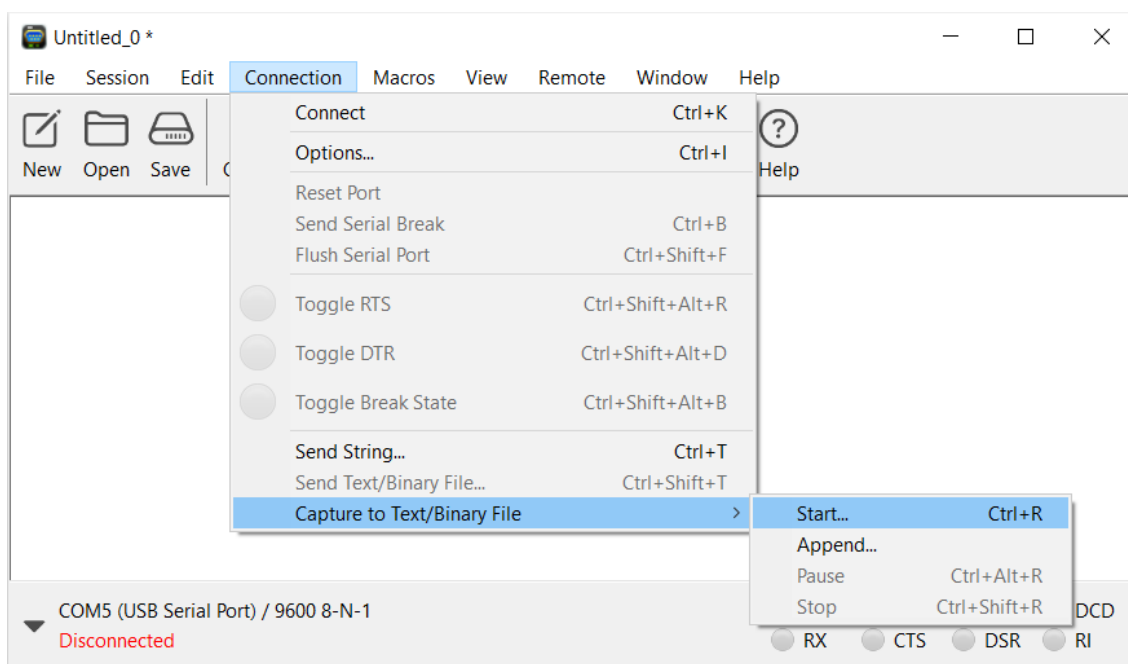
Před spuštěním tohoto programu je důležité, aby byly správně nainstalovány ovladače FTDI (viz. kapitola 3.3) a zařízení bylo připojeno do kompatibilního USB konektoru (USB 2.0 a výše). Tento fakt lze (při použití operačního systému Windows) potvrdit ve správci zařízení, kde se po připojení zobrazí nové zařízení mezi porty sériového rozhraní.



Obrázek 3.3 Příklad zobrazení připojeného zařízení ve správci zařízení operačního systému Windows při správné instalaci ovladačů

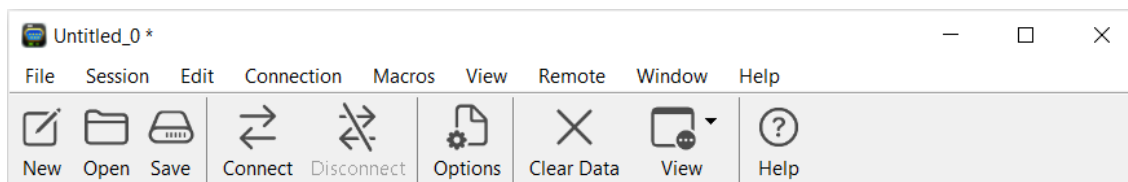
Po spuštění programu CoolTerm s připojeným zařízením se program pokusí identifikovat sériový komunikační port a zeptá se uživatele, zda jej našel správně. Vzhledem k nepravděpodobnému výskytu dalšího zařízení využívajícího sériovou komunikaci stejného typu stačí ověřit, že se číslo sériového portu zjištěného programem CoolTerm shoduje s číslem ve správci zařízení (zde COM 5, dle obrázku 3.3) a potvrdit program, že jej našel. Následně se číslo komunikačního portu zobrazí v grafickém rozhraní vlevo dole (na obrázku 3.4 sériový port COM 5 s nastavenou rychlostí přenosu 9600 bitů za sekundu). Vzhledem k arbitrárnímu přiřazování čísel sériových komunikačních portů v operačním systému Windows není nutné, aby se komunikační port vždy prezentoval číslem 5, je pouze nutné, aby údaj ze správce zařízení souhlasil s údajem v programu CoolTerm.

Pro spuštění záznamu dat ze zařízení do souboru typu .txt je nutné navigovat v ovládacím panelu (dle obrázku 3.4) do záložky „Connection,“ „Capture to Text/Binary File,“ „Start“.



Obrázek 3.4 Menu pro spuštění, nebo ukončení ukládání dat přijatých ze zařízení

Po zvolení názvu souboru a místa jeho uložení následuje spojení programu se zařízením pomocí tlačítka „Connect“ na ovládacím panelu (viz. obrázek 3.5), po kterém se připojené zařízení restartuje. Aby bylo zařízení připraveno k měření, je potřeba (stejně jako při funkci bez připojeného počítače) vyčkat na zobrazení textu „ready“ na displeji zařízení (viz. obrázek 3.2).



Obrázek 3.5 Ovládací panel programu CoolTerm

Pro ukončení záznamu naměřených hodnot lze použít stejný postup jako při jeho spuštění s použitím tlačítka „Stop“ v posledním kroku. Výsledný soubor obsahuje jednotlivé naměřené časy s daty oddělenými středníky v pořadí:

- číslo závodu,
- naměřené minuty,
- naměřené sekundy,

s prvním řádkem označujícím tato pole pro případné pozdější zpracování tabulkovým programem (viz. obrázek 3.6).

```
run;min;sec  
1; 0;13.03  
2; 2;57.32
```

Obrázek 3.6 Příklad výstupního souboru se dvěma měřeními

4 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout a realizovat zařízení umožňující spolehlivě detekovat průjezd závodníka stanovištěm za účelem přesného měření času mezi průjezdy. Výsledné zařízení měří čas mezi dvěma průjezdy, zobrazuje jej na displeji a naměřená data odesílá do počítače (je-li připojen). Při návrhu bylo dbáno na jednoduchost, nízkou cenu a technickou proveditelnost, aby zařízení vyhovovalo požadavkům organizátorů projektu Robotárna, případně podobných soutěží.

V teoretické části práce byly prostudovány možné metody detekce a porovnány z hlediska přesnosti a složitosti implementace. Na základě tohoto porovnání byla vybrána metoda detekce přerušení modulovaného infračerveného paprsku. Praktická část se následně věnovala výběru vhodných komponent, návrhu zapojení, designu desek plošných spojů, vývoji firmwaru a testování funkčnosti zařízení.

V průběhu testování zařízení byla zjištěna odchylka frekvence modulační vlny (naměřeno 34,65 kHz místo ideálních 38 kHz), která byla pravděpodobně způsobena tolerancemi pasivních součástek. Tato odchylka však neměla vliv na funkčnost detekční části zařízení, která spolehlivě rozpoznala přítomnost, či nepřítomnou paprsku i za přítomnosti externích zdrojů rušení. Pro zvýšení přesnosti měření byl do programu implementován korekční koeficient kompenzující nepřesnosti interního RC oscilátoru mikrokontroleru. Koeficient byl určen sérií kalibračních měření v běžných podmínkách (při teplotě 20 °C), čímž bylo dosaženo výsledné odchylky menší, než 0,2 %. Tato přesnost je pro danou aplikaci plně dostačující. Je však potřeba zmínit, že při výrazně odlišných teplotách může docházet k chybě měření, jelikož vlastnosti RC oscilátoru jsou teplotně závislé.

Zařízení bylo úspěšně realizováno a je možné jej použít jak v samostatném režimu, tak v režimu připojení do počítače. V budoucnu je možné rozšířit funkčnost zařízení například o lokální ukládání naměřených dat nebo externí zdroj hodinového signálu eliminující potřebu teplotní kalibrace.

LITERATURA

- [1] KOSINSKI, Robert J. *A Literature Review on Reaction Time* [online]. B.m.: Clemson University. září 2013 [vid. 2025-06-02].
Dostupné z: <https://www.sciencebuddies.org/Files/16478/4/clemson.rt.pdf>
- [2] MANNATH, Rachana. *Difference Between Tactile and Non-tactile Membrane Switches | Rangavishwa Enterprises* [online]. 14. srpen 2019 [vid. 2025-06-02].
Dostupné z: <https://rangvishwa.com/blogs/difference-between-tactile-and-non-tactile-membrane-switches/>
- [3] KOLAJA, Jan a Jana Kolaja EHLEROVA. *Effectivity of Sports Timing RFID System, Field Study*. In: 2019 IEEE International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA) [online]. Pisa, Italy: IEEE, 2019, s. 220–223 [vid. 2025-06-02]. ISBN 978-1-72810-589-5. Dostupné z: doi:10.1109/RFID-TA.2019.8892108
- [4] PERRY, Lacy a Kate KERSHNER. *How Olympic Timing Works*. HowStuffWorks [online]. 24. srpen 2004 [vid. 2025-06-02]. Dostupné z: <https://entertainment.howstuffworks.com/olympic-timing.htm>
- [5] SLINEY, D. H. What is light? The visible spectrum and beyond. *Eye* [online]. 2016, **30**(2), 222–229. ISSN 0950-222X, 1476-5454. Dostupné z: doi:10.1038/eye.2015.252
- [6] BONIFACIO, Vasco D. B. a Rita F. PIRES. *Photodiodes: Principles and recent advances*. *Materials NanoScience*. 2019, **6**(2), 38–46. ISSN 2394-0867. Dostupné z: <https://pubs.thesciencein.org/journal/index.php/jmns/article/view/235>
- [7] MICHALEK, D. *Fotodioda VA charakteristika při různém osvětlení* [online]. 8. prosinec 2007 [vid. 2025-06-02]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fotodioda_VA_charakteristika_pri_ruzn%C3%A9m_osv%C4%9Btlen%C3%AD.jpg
- [8] FREDES, Camilo, Pablo Palacios JATIVA, Cesar Azurdia MEZA a Ismael SOTO. *Design and Evaluation of an Experimental Visible Light Communications Platform*. In: 2022 IEEE International Conference on Automation/XXV Congress of the Chilean Association of Automatic Control (ICA-ACCA) [online]. Curicó, Chile: IEEE, 2022, s. 1–5 [vid. 2025-06-02]. ISBN 978-1-66549-408-3. Dostupné z: doi:10.1109/ICA-ACCA56767.2022.10006115
- [9] GHASSEMLOOY, Z., W.O. POPOOLA, S. RAJBHANDARI, M. AMIRI a S. HASHEMI. *A synopsis of modulation techniques for wireless infrared communication*. In: 2007 ICTON Mediterranean Winter Conference: 2007 ICTON Mediterranean Winter Conference [online]. 2007, s. 1–6 [vid. 2025-06-02]. ISBN 978-1-4244-1638-7.
Dostupné z: doi:10.1109/ICTONMW.2007.4446952
- [10] STENKAISER. *Understanding the photo finish*. appmaker.se [online]. 15. září 2016 [vid. 2025-06-02]. Dostupné z: <https://appmaker.se/understanding-the-photo-finish/>

- [11] ATMEL CORPORATION. *Atmel 7810 Automotive Microcontrollers ATmega328P* [online]. B.m.: Atmel Corporation. leden 2015 [vid. 2025-06-02]. Dostupné z: https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/MCU08/ProductDocuments/DataSheets/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf
- [12] CAMPBELL, Scott. *Basics of the SPI Communication Protocol*. Circuit Basics [online]. 13. únor 2016 [vid. 2025-06-02]. Dostupné z: <https://www.circuitbasics.com/basics-of-the-spi-communication-protocol/>
- [13] WEI, Haibo, Jianwei MEI, Jie LIU, Zhaozhao WANG, Shengli FANG a Long WANG. *Application Research on Data Reliability of SPI Bus between Microprocessors*. In: 2021 IEEE 4th International Conference on Electronics Technology (ICET) [online]. 2021, s. 347–351 [vid. 2025-06-02]. ISBN 978-1-72817-673-4. Dostupné z: doi:10.1109/ICET51757.2021.9450983
- [14] HAYA. *ARDUINO NANO-A COMPLETE GUIDE*. Matha Electronics [online]. 22. únor 2022 [vid. 2025-06-02]. Dostupné z: <https://www.mathaelectronics.com/arduino-nano-a-complete-guide/>
- [15] CAMPBELL, Scott. *Basics of the I2C Communication Protocol*. Circuit Basics [online]. 13. únor 2016 [vid. 2025-06-02]. Dostupné z: <https://www.circuitbasics.com/basics-of-the-i2c-communication-protocol/>
- [16] CHEN, Jinrong a Shengqiu HUANG. *Analysis and Comparison of UART, SPI and I2C*. In: 2023 IEEE 2nd International Conference on Electrical Engineering, Big Data and Algorithms (EEBDA): 2023 IEEE 2nd International Conference on Electrical Engineering, Big Data and Algorithms (EEBDA) [online]. 2023, s. 272–276 [vid. 2025-06-02]. ISBN 978-1-66546-253-2. Dostupné z: doi:10.1109/EEBDA56825.2023.10090677
- [17] HUANG, Weilun a Guolun SHENG. *Analysis and Research on UART Communication Protocol*. In: 2024 4th Asia-Pacific Conference on Communications Technology and Computer Science (ACCTCS) [online]. 2024, s. 768–771 [vid. 2025-06-02]. ISBN 9798350359985. Dostupné z: doi:10.1109/ACCTCS61748.2024.00140
- [18] VISHAY INTERTECHNOLOGY INC. *Si2302CDS, N-Channel 20 V (D-S) MOSFET* [online]. B.m.: Vishay Intertechnology Inc. 8. leden 2012 [vid. 2025-06-02]. Dostupné z: <https://www.vishay.com/docs/68645/si2302cds.pdf>
- [19] TEXAS INSTRUMENTS INC. *Nx556, Sx556 Dual Precision Timers* [online]. B.m.: Texas Instruments Inc. květen 2025 [vid. 2025-06-02]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ne556.pdf>
- [20] VISHAY INTERTECHNOLOGY INC. *TSSP40., IR Sensor Module For Reflective Sensor, Light Barrier, And Fast Proximity Applications* [online]. B.m.: Vishay Intertechnology Inc. 23. květen 2025 [vid. 2025-06-02]. Dostupné z: <https://www.vishay.com/docs/82458/tssp40.pdf>

- [21] FUTURE TECHNOLOGY DEVICES INTERNATIONAL LIMITED. *VCP Drivers – FTDI* [online]. 13. červenec 2020 [vid. 2025-06-02]. Dostupné z: <https://ftdichip.com/drivers/vcp-drivers/>, <https://ftdichip.com/drivers/vcp-drivers/>
- [22] MEIER, Roger. *Roger Meier's Freeware* [online]. 19. květen 2025 [vid. 2025-06-02]. Dostupné z: <https://freeware.the-meiers.org/>
- [23] VISHAY INTERTECHNOLOGY INC. *TSAL6200, High Power Infrared Emitting Diode, 940 nm, GaAlAs, MQW* [online]. B.m.: Vishay Intertechnology Inc. 13. březen 2014 [vid. 2025-06-02]. Dostupné z: <https://www.vishay.com/docs/81010/tsal6200.pdf>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

RFID	Radiofrekvenční identifikace
USB	Univerzální sériová sběrnice
PC	Osobní počítač
AM	Amplitudová modulace
OOK	On-Off keying (amplitudová modulace digitálního signálu pomocí zapínání a vypínání nosného signálu)
SPI	Sériové periferní rozhraní
ISP	Vnitrosystémové programovací rozhraní
UART	Univerzální asynchronní vysílač-přijímač
I2C	Inter-integrovaný obvod

Symboly:

<i>U</i>	napětí	[V]
<i>I</i>	proud	[A]
<i>f</i>	frekvence	[Hz]
<i>C</i>	kapacita	[F]
<i>R</i>	odpor	[Ω]
<i>T</i>	perioda	[s]

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A - VÝPOČET HODNOT PASIVNÍCH KOMPONENT PRO ZAPOJENÍ ČASOVAČE TI NE556	48
--	----

Příloha A - Výpočet hodnot pasivních komponent pro zapojení časovače Ti NE556

výchozí vzorce:

$$\frac{t_H}{T} \cong \frac{R_A + R_B}{R_A + 2R_B}$$

$$T \cong 0,693 \cdot C_T \cdot (R_A + 2R_B)$$

$$T = \frac{1}{f}$$

výpočet pro výstupní frekvenci 38 kHz:

$$T = \frac{1}{38 \cdot 10^3}$$

$$\frac{1}{38 \cdot 10^3} = 0,693 \cdot 10^{-9} \cdot (R_A + 2R_B)$$

$$\frac{10^9}{38 \cdot 10^3 \cdot 0,693} = 10^3 + 2R_B$$

$$R_B = \frac{\frac{10^6}{38 \cdot 0,693} - 10^3}{2}$$

$$R_B \cong 18486,9 \Omega$$

$$R_B \cong 18 \text{ k}\Omega$$

$$C_T = 1 \text{ nF}$$

$$C_T = 10^{-9} \text{ F}$$

$$R_A = 1 \text{ k}\Omega$$

$$R_B = 18 \text{ k}\Omega$$

$$\text{střída} = \frac{R_A + R_B}{R_A + 2R_B}$$

$$= \frac{10^3 + 18 \cdot 10^3}{10^3 + 2 \cdot 18 \cdot 10^3}$$

$$= \frac{19}{37} = \overline{0,513}$$

$$f = \frac{1}{0,693 \cdot C_T \cdot (R_A + 2R_B)}$$

$$= \frac{1}{0,693 \cdot 10^{-9} \cdot (10^3 + 2 \cdot 18 \cdot 10^3)}$$

$$f \cong 39 \text{ kHz}$$

výpočet pro výstupní frekvenci blízkou 500 Hz:

$$T = \frac{1}{500}$$

$$\frac{1}{500} = 0,693 \cdot 2,2 \cdot 10^{-7} \cdot (R_A + 2R_B)$$

$$\frac{10^7}{2,2 \cdot 500 \cdot 0,693} = 750 + 2R_B$$

$$R_B = \frac{\frac{10^7}{2,2 \cdot 500 \cdot 0,693} - 750}{2}$$

$$R_B \cong 6184,1 \Omega$$

$$R_B \cong 6,2 \text{ k}\Omega$$

$$C_T = 0,22 \mu F$$

$$C_T = 2,2 \cdot 10^{-7} F$$

$$R_A = 750 \Omega$$

$$R_B = 6,2 \text{ k}\Omega$$

$$\text{střída} = \frac{R_A + R_B}{R_A + 2R_B}$$

$$= \frac{750 + 6,2 \cdot 10^3}{750 + 2 \cdot 6,2 \cdot 10^3}$$

$$= \frac{139}{263} \cong 0,529$$

$$\text{střída} \cong 52,9 \%$$

$$f = \frac{1}{0,693 \cdot C_T \cdot (R_A + 2R_B)}$$

$$= \frac{1}{0,693 \cdot 2,2 \cdot 10^{-7} \cdot (750 + 2 \cdot 6,2 \cdot 10^3)}$$

$$f \cong 498,8 \text{ kHz}$$