

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV POČÍTAČOVÝCH SYSTÉMŮ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY  
DEPARTMENT OF COMPUTER SYSTEMS

## ČASOMÍRA PRO POŽÁRNÍ SPORT VYUŽÍVAJÍCÍ BEZDRATOVÉ TECHNOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. RADIM ŠOSTÝ

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV POČÍTAČOVÝCH SYSTÉMŮ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY  
DEPARTMENT OF COMPUTER SYSTEMS

# ČASOMÍRA PRO POŽÁRNÍ SPORT VYUŽÍVAJÍCÍ BEZDRATOVÉ TECHNOLOGIE

TIME MEASUREMENT FOR FIRESPORT WITH WIRELESS SENSORS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. RADIM ŠOSTÝ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ZDENĚK VAŠÍČEK, Ph.D.

BRNO 2014

## Abstrakt

Práce se zabývá návrhem a implementací flexibilního modulárního systému elektronické časomíry pro požární sport. Jednou z předností systému je možnost použití bezdrátové komunikace se senzory a zobrazovacími prvky. Vyvinutý systém se skládá z hlavní řídicí jednotky, externího displeje, bezdrátových modulů pro komunikaci se senzory a desktopové aplikace pro sběr dat a ovládání systému. V práci je popsáno řešení komponent systému, způsob komunikace mezi nimi a metoda časové synchronizace bezdrátových zařízení.

## Abstract

This thesis deals with design and implementation of flexible modular electronic stopwatch system for use in firesport. One of the advantages of the system is possibility of using wireless communication with sensors and displays. Developed system consist of main control unit, external display, wireless modules for communication with the sensors and desktop application that collects data and controls the system. Solution of system components, communication between them and method of time synchronization of wireless devices is also described in this thesis.

## Klíčová slova

Elektronická časomíra, požární sport, mikrokontrolér, Microchip, RS485, CC1101, bezdrátová komunikace, USB, SimpliCI, Reference Broadcast Synchronization, Texas Instruments

## Keywords

Electronic stopwatch system, fire sport, microcontroller, Microchip, RS485, CC1101, wireless communication, USB, SimpliCI, Reference Broadcast Synchronization, Texas Instruments

## Citace

Radim Šostý: Časomíra pro požární sport využívající bezdrátové technologie, diplomová práce, Brno, FIT VUT v Brně, 2014

# Časomíra pro požární sport využívající bezdrátové technologie

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně pod vedením pana Ing. Zdeňka Vašíčka, Ph.D., s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury.

.....  
Radim Šostý  
26. května 2014

## Poděkování

Děkuji panu Ing. Zdeňku Vašíčkovi, Ph.D. za vedení a odbornou pomoc při vypracování práce. Poděkovat chci i mé rodině a přítelkyni za podporu při studiu. Obzvláště mému otci Ing. Zdeňkovi Šostému a bratru Pavlovi Šostému za pomoc při konstrukci externího displeje a sklopných terčů. Dále děkuji Lukáši Gerykovi za návrh a osazení desek plošných spojů a sponzorům Fronius ČR, s.r.o., HLH divize O.K., s.r.o., TopCNC, s.r.o., Haně a Janovi Židkovým a Daliboru Velčovskému za financování projektu.

© Radim Šostý, 2014.

*Tato práce vznikla jako školní dílo na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě informačních technologií. Práce je chráněna autorským zákonem a její užití bez udělení oprávnění autorem je nezákonné, s výjimkou zákonem definovaných případů.*

# Obsah

<b>1 Úvod</b>	<b>6</b>
<b>2 Požární sport</b>	<b>8</b>
2.1 Požární útok . . . . .	9
2.2 Běh na 100 m s překážkami . . . . .	10
<b>3 Současný stav</b>	<b>12</b>
3.1 Časomíra firmy Knězek, s.r.o. . . . .	13
3.2 Časomíra firmy LV . . . . .	14
3.3 Časomíra firmy TRV elektronik . . . . .	15
3.4 Původní řešení mé časomíry . . . . .	16
3.5 Zhodnocení . . . . .	17
<b>4 Možnosti bezdrátové komunikace</b>	<b>18</b>
4.1 Dostupné RF moduly a čipy . . . . .	18
4.2 Bezdrátové protokoly . . . . .	20
4.3 Shrnutí . . . . .	22
4.4 RF moduly s čipem CC1101 . . . . .	23
4.5 Knihovna SimpliciTI® . . . . .	25
<b>5 Návrh modulárního systému časomíry</b>	<b>29</b>
5.1 Hlavní řídicí jednotka . . . . .	30
5.2 Řízení externího displeje . . . . .	31
5.3 Bezdrátový modul pro komunikaci s terčí/optickými závorami . . . . .	32
5.4 Bezdrátový modul startovní pistole . . . . .	33
<b>6 Implementace hlavní řídicí jednotky</b>	<b>34</b>
6.1 Mikrokontrolér . . . . .	34
6.2 SPI sběrnice . . . . .	35
6.3 Detaily zapojení . . . . .	37
6.4 Algoritmus řízení časomíry . . . . .	41
<b>7 Implementace bezdrátové komunikace</b>	<b>44</b>
7.1 Vyhledání a rozpoznání bezdrátových zařízení . . . . .	44
7.2 Synchronizace bezdrátových zařízení . . . . .	44
7.3 Testování dosahu a spolehlivosti bezdrátové komunikace . . . . .	49

<b>8 Implementace externích displejů</b>	<b>50</b>
8.1 Obvodová realizace . . . . .	51
8.2 Komunikační protokoly . . . . .	53
<b>9 Implementace bezdrátových modulů</b>	<b>57</b>
9.1 Modul startovní pistole . . . . .	57
9.2 Moduly terčů/optických závor . . . . .	59
9.3 Vyhodnocení parametrů bezdrátové komunikace . . . . .	60
<b>10 Desktopová aplikace</b>	<b>62</b>
<b>11 Závěr</b>	<b>65</b>

# Seznam obrázků

2.1	Nákres dráhy požárního útoku na 3B (převzato z [1]) . . . . .	10
2.2	Nákres dráhy pro běh na 100 m s překážkami (převzato z [1]) . . . . .	11
3.1	Fotografie třířádkového displeje časomíry firmy Kněžek, s.r.o. . . . .	13
3.2	Fotografie dvouřádkového displeje časomíry firmy LV . . . . .	14
3.3	Displeje nabízené k systému časomíry firmy TRV (převzato z [5]) . . . . .	15
3.4	Fotografie displeje systému časomíry navrženého v mé bakalářské práci . . . . .	16
4.1	Blokové schéma čipu CC1101 (převzato z [11]) . . . . .	20
4.2	Vrstvy protokolu technologie ZigBee (převzato z [13]) . . . . .	21
4.3	RF modul pro Arduino s čipem CC1101 (převzato z [16]) . . . . .	23
4.4	Struktura paketu vytvářeného čipem CC1101 (převzato z [11]) . . . . .	25
4.5	Vrstvy protokolu SimpliciTI (převzato z [17]) . . . . .	26
4.6	Struktura paketu SimpliciTI (převzato z [17]) . . . . .	26
5.1	Schéma modulárního systému časomíry . . . . .	30
5.2	Schéma řídicí jednotky systému časomíry . . . . .	31
5.3	Schéma řízení displeje s proměnným počtem řádků . . . . .	32
5.4	Schéma bezdrátového modulu pro komunikaci s terčí/optickými závoryami . . . . .	32
5.5	Schéma bezdrátového modulu startovní pistole . . . . .	33
6.1	Blokové schéma zapojení sběrnice SPI . . . . .	36
6.2	SPI komunikace slave → master . . . . .	37
6.3	SPI komunikace master → slave . . . . .	38
6.4	Blokové schéma zapojení Input MCU . . . . .	38
6.5	Konečný automat pro zpracování vstupů Input MCU . . . . .	39
6.6	Blokové schéma zapojení Comm MCU . . . . .	40
6.7	Blokové schéma zapojení hlavního MCU . . . . .	41
6.8	Vývojový diagram hlavní smyčky algoritmu řízení systému časomíry . . . . .	42
7.1	Proces vyhledání a rozpoznání bezdrátových zařízení v síti . . . . .	45
7.2	Porovnání kritické cesty komunikace při použití klasického synchronizačního protokolu (vlevo) a RBS (vpravo) (převzato z [18]) . . . . .	46
7.3	Proces synchronizace bezdrátových modulů systému elektronické časomíry . . . . .	48
8.1	Výkres čelní strany dvouřádkového provedení displeje . . . . .	51
8.2	Výkres čelní strany třířádkového provedení displeje . . . . .	52
8.3	Blokové schéma zapojení řídicí jednotky externího displeje . . . . .	53
8.4	Blokové schéma zapojení DPS řídicí řádek displeje . . . . .	53

8.5	Protokol komunikace mezi hlavní řídicí jednotkou časomíry a externím displejem . . . . .	54
8.6	Struktura paketu protokolu pro RS485 . . . . .	55
9.1	Blokové schéma zapojení bezdrátového modulu startovní pistole . . . . .	58
9.2	Blokové schéma zapojení bezdrátového modulu terčů/optických závor . . . . .	59
10.1	Hlavní okno aplikace v módu měření požárního útoku . . . . .	62
10.2	Okno pro nastavení měření . . . . .	63
10.3	Hlavní okno aplikace v módu měření běhu na 100 m s překážkami . . . . .	64



# Seznam tabulek

4.1	Bezlicenční pásma pro provoz zařízení krátkého dosahu . . . . .	18
4.2	Význam bitů stavového bajtu čipu CC1101 . . . . .	24
4.3	Význam položek SimpliciTI paketu . . . . .	27
6.1	Parametry vybraných mikrokontrolérů . . . . .	35
6.2	Příkazy pro SPI komunikaci mezi hlavním MCU a Comm MCU . . . . .	36
6.3	Příkazy pro SPI komunikaci mezi hlavním MCU a Input MCU . . . . .	40
8.1	Význam bitů v DATALEN bajtu paketu . . . . .	56
8.2	Význam bajtů v bufferu pro RS485 komunikaci . . . . .	56
9.1	Výsledky měření přesnosti časové synchronizace bezdrátových zařízení . . . . .	61

# Kapitola 1

## Úvod

Tato práce se zabývá návrhem a implementací flexibilního modulárního systému časomíry určeného pro měření času v disciplínách požárního sportu. Práce se dále zabývá možnostmi bezdrátového připojení senzorů a zobrazovacích prvků, jeho návrhem a implementací a vyhodnocením parametrů nalezeného řešení.

V podstatě ve všech moderních sportech zaměřených na rychlost provedení nějakého úkonu je nutné měřit čas elektronicky. Požární sport není výjimkou. Například časy dosažené nejlepšími družstvy v disciplíně požární útok od sebe dělí mnohdy jen setiny nebo dokonce tisíce sekundy. Navíc povinnost měřit čas elektronicky se do Směrnic hasičských sportovních soutěží pro muže a ženy dostala už v roce 1988 [1].

Návrhem elektronické časomíry pro požární sport jsem se zabýval již v rámci mé bakalářské práce [2]. Byl navržen systém časomíry pro měření disciplín požární útok a běh na 100 m s překážkami, který sestával z řídicí jednotky zabudované do velkého sedmisegmentového displeje, terčů s koncovými spínači, startovní pistole s tlačítky stop a reset a počítačové aplikace pro sběr a vyhodnocení změřených časů, ke které se řídicí jednotka připojovala pomocí rozhraní RS232.

Během provozu časomíry v letech 2012 a 2013 však byly zjištěny nedostatky v návrhu, zejména v oblasti desek plošných spojů, které zapříčinily vysokou poruchovost časomíry. Taktéž nastaly požadavky na možnost použití více senzorů pro snímání času z důvodu velké variability soutěží v požárním útoku v kraji, kde žiji. A dále stále sílí poptávka po bezdrátovém řešení připojení senzorů, které by zvýšilo rychlost instalace systému časomíry v místě konání soutěže.

Proto jsem se rozhodl navázat na výsledky mé bakalářské práce a navrhnout úpravy systému tak, aby dovoľoval měřit čas z více senzorů a podporoval zobrazování naměřených časů na více displejích. Z toho pak přímo plyne nutnost návrhu a implementace bezdrátové komunikace mezi komponentami systému, protože cena kabeláže by neúměrně vzrostla.

Cílem této práce tak je navrhnout modulární systém časomíry pro požární sport využívající pro připojení senzorů a displejů k řídicí jednotce časomíry bezdrátové technologie. K tomu je zapotřebí nastudovat možnosti realizace vestavěných zařízení vhodných pro tyto účely a možnosti bezdrátových technologií. Práce dále pokračuje implementací navrženého systému a vyhodnocením parametrů tohoto řešení zejména z pohledu spolehlivosti a kapacity bezdrátové komunikace

Kapitola 2 obsahuje informace o požárním sportu a jeho disciplínách z pohledu požadavků na systém časomíry. V kapitole 3 jsou popsána současná řešení včetně systému navrženého v mé bakalářské práci. Dostupné bezdrátové technologie a principy jsou shrnuty v kapitole 4. Vlastní návrh modulárního systému časomíry je v kapitole 5.

Implementace hlavní řídicí jednotky časoměry je rozebrána v kapitole 6. Popis použitého bezdrátového řešení a vyhodnocení jeho parametrů je v části 7. V kapitolách 8, 9 a 10 je popis implementace externích displejů, bezdrátových modulů senzorů a desktopové aplikace.

## Kapitola 2

# Požární sport

V této kapitole je blíže popsán požární sport a jeho disciplíny tak, aby bylo možné specifikovat základní požadavky na systém elektronické časomíry sloužící k měření časů disciplín požární útok a běh na 100 m s překážkami.

O požárním sportu se hovoří již od roku 1937, kdy oficiálně vznikl v bývalém Sovětském svazu. Odtud se dostal do tehdejší Československé socialistické republiky díky bývalému náčelníkovi Hlavní správy požární ochrany ČSSR Ing. Pavlu Stokláskovi, který provedení disciplín požárního sportu viděl na své služební cestě do SSSR. Tento sport se mu zalíbil a rozhodl se získat o něm co nejvíce informací a začít s ním i v Československu. Pavel Stoklásek je tak de facto zakladatel požárního sportu v naší vlasti [3].

Původní myšlenkou požárního sportu je příprava profesionálních hasičů na výkon jejich povolání. Především jde o rozvíjení fyzické zdatnosti, rychlosti a obratnosti jedince, která je nezbytná při zasahování u požárů. Tento sport je součástí odborné a fyzické přípravy profesionálních hasičů již od roku 1970. Od počátku existují čtyři disciplíny – jsou to běh na 100 m s překážkami, štafeta 4x100 m s překážkami, výstup do 4. podlaží cvičné věže a požární útok.

Velmi oblíbený je požární sport i mezi sbory dobrovolných hasičů, kde se mu věnují jak dospělí jedinci, tak především i děti. K 1. lednu 2013 bylo ve sborech dobrovolných hasičů zaregistrováno 49 801 dětí ve věku od 6 do 18 let [4]. Požární sport se tedy významně podílí na výchově mládeže. Odhadem se v současnosti tomuto sportu věnuje v České republice okolo 7000 týmů dobrovolných hasičů ve všech věkových kategoriích. Každý rok se pořádají mistrovství republiky v požárním sportu profesionálních i dobrovolných hasičů. Od roku 2011 se navíc pořádá i Akademické mistrovství v požárním sportu, které zaštiťuje Fakulta bezpečnostního inženýrství Vysoké školy báňské v Ostravě. V roce 2014 se ho zúčastnilo 11 vysokých a 12 středních škol z ČR i Slovenska.

V České republice se o požární sport starají dvě hlavní organizace. První je Sdružení hasičů Čech, Moravy a Slezska (SH ČMS), které má mimo jiné na starosti organizaci soutěží dobrovolných hasičů. Dále vydává Směrnice hasičských sportovních soutěží pro muže a ženy a pořádá Mistrovství České republiky v požárním sportu dobrovolných hasičů. Postupové soutěže na mistrovství republiky mají ve své kompetenci příslušné územní orgány SH ČMS.

Soutěže profesionálních hasičů organizuje Hasičský záchranný sbor České republiky (HZS ČR), který pořádá své vlastní mistrovství republiky pro profesionální hasiče a sestavuje profesionální českou reprezentaci, která se velmi úspěšně zúčastňuje Mistrovství světa v požárním sportu.

Následuje popis dvou hlavních disciplín požárního sportu, na které je zaměřen návrh systému elektronické časomíry, kterým se zabývá tato práce.

## 2.1 Požární útok

Požární útok je disciplína, které se účastní týmy o maximálním počtu sedmi závodníků. Provedení útoku má simulovat úkony, které je nutné provést při zásahu u opravdového požáru. Závodníci nejprve pomocí savic a sacího koše sestaví přívodní vedení, kterým naberou vodu z nádrže o objemu minimálně  $1\text{ m}^3$ . Voda se poté čerpá požární motorovou stříkačkou a dopravuje se přes dopravní vedení sestavené z hadic B do rozdělovače. Odtud se voda dělí na dva útočné proudy sestavené z hadic C, které jsou zakončeny proudnicí. Závodníci na proudech mají za úkol srazit vodou závaží na terčích, nebo naplnit 10 l nádobu v terči. Tyto úkony je potřeba provést co nejrychleji, čas se měří od výstřelu startovní pistole po sražení, či naplnění posledního terče.

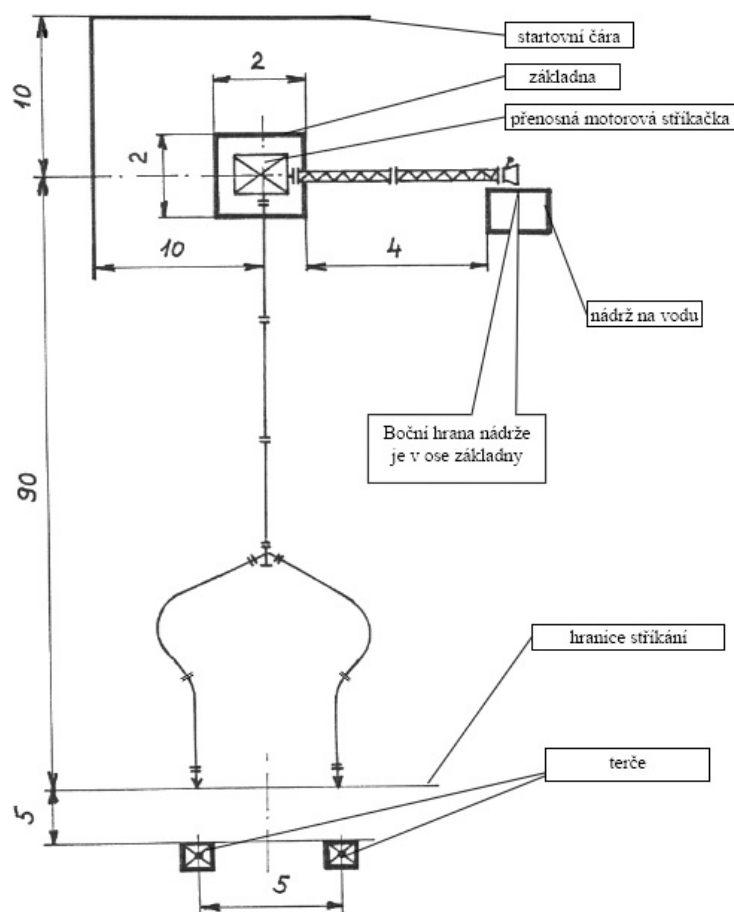
Od startovní čáry po střed základny je 10 m náběh. Základna slouží pro uložení nářadí potřebného pro provedení útoku, tedy hadic, proudnic, savic, rozdělovače, sacího koše, klíčů ke spojení savic a požární motorové stříkačky. Žádné nářadí, s výjimkou savic, nesmí přesahovat základnu a žádné nářadí se nesmí dotýkat země. Délka dráhy od středu základny po čáru výstřiku se liší podle počtu hadic B použitých pro provedení útoku. Varianta pro 2 B má dráhu dlouhou 70 m, pro 3 B to je pak 90 m. Čelní strany terčů jsou od čáry výstřiku vzdáleny 5 m. Mezi středy terčů je 5 m mezera. Náskres klasické dráhy na 3 B pro požární útok je na obrázku 2.1.

Ženy dle pravidel požárního sportu provádějí požární útok pouze na dvě hadice B. Pro muže je určena trať na 3 B, mohou však soutěžit i jenom na 2 B. Toto se běžně praktikuje např. v Moravskoslezském kraji, který je těmito závody známý a soutěže na 3 B se zde v podstatě téměř nevyskytují.

Dalším specifikem závodů v Moravskoslezském kraji jsou tzv. přepojovací soutěže. Především v oblasti Beskyd je problém najít dostatečně dlouhý a rovný terén vhodný pro uspořádání soutěže v požárním útoku, proto pořadatelé vymýšleli způsoby, jak zkrátit dráhu tak, aby zároveň nedošlo ke snížení náročnosti provedení disciplíny. Řešení se sbor od sboru lišilo, někde např. zavedli dvoufázové provedení útoku, kdy se sestaví vedení ze dvou B a jednoho C na každý proud, sestříkne se první dvojice terčů, poté se vedení nastaví na obou proudech o jedno C a sestříkují se další dva terče, které určují výsledný čas. Jiné sbory zavedly sání vody z potoka místo kádě. Dále existují soutěže s různými překážkami apod. Tato tradice je dodržována dodnes, v roce 2005 byla dokonce založena Beskydská liga hasičských požárních soutěží, která sdružuje tyto přepojovací soutěže.

Požární útok je doménou především družstev dobrovolných hasičů, kde je velmi oblíbený. Tato disciplína zaznamenala velký rozvoj především v posledních 20 letech, kdy se začaly upravovat motory a čerpadla požárních stříkaček, které tak získaly mnohem vyšší výkon a byly schopny naplnit hadicové vedení vodou podstatně rychleji. Tím se samozřejmě zkrátil čas pro závodníky, kteří museli roztáhnout hadice a doběhnout k čáře výstřiku v kratším čase. To donutilo závodníky zlepšovat svou fyzickou kondici a více trénovat. Díky tomu družstva zlepšovala své výkony a disciplína tak získala větší atraktivitu pro diváky i samotné soutěžící.

V České i Slovenské republice momentálně existuje velké množství ligových soutěží, které se liší způsobem provedení útoku i kvalitou závodníků. Nejlepší výkony předvádějí družstva v Extralize České republiky v požárním útoku, kde jsou k vidění výkony srovnatelné s výkony profesionálních sportovců v jakémkoliv jiném sportu. Specifikem ligových soutěží je, že neexistuje žádný systém postupování mezi výkonnostními úrovněmi. Každý tým se může přihlásit i do Extraligy, pokud sežene potřebné finance na cestování napříč celou republikou. Většina týmů tak volí ligu úměrnou své výkonnosti, kde může uspět.

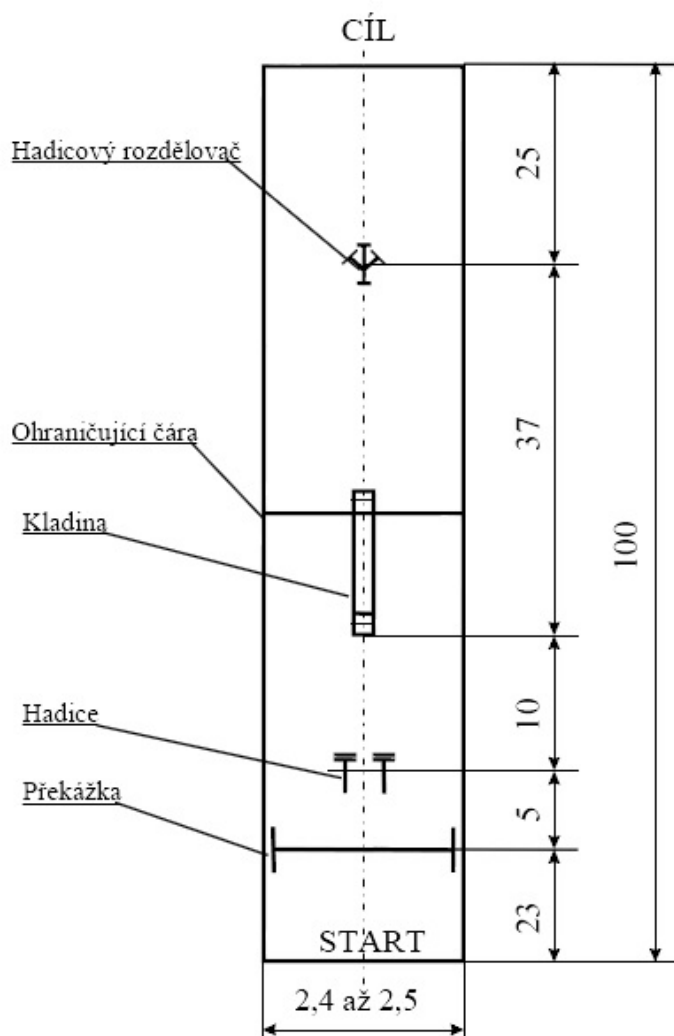


Obrázek 2.1: Nákres dráhy požárního útoku na 3 B (převzato z [1])

## 2.2 Běh na 100 m s překážkami

Tato disciplína je čistě individuální, byť na postupových soutěžích se její výsledky mohou započítávat do celkového hodnocení družstva. Závodník má za úkol nejdříve překonat 2 m vysokou bariéru, poté uchopí dvě smotané hadice, které má nachystány na dráze za bariérou. S nimi přeběhne 1,2 m vysokou a 12 m dlouhou kladinu. Za ní hadice rozhodí, jedny konce hadic spojí do sebe, další konec zapojí na přichystaný rozdělovač a na poslední koncovku připojí proudnici, kterou si závodník nese s sebou již od startu pokusu. Po provedení všech těchto úkonů může teprve proběhnout cílovou čarou. Nákres dráhy pro tuto disciplínu je na obrázku 2.2. Ženy disciplínu provádějí stejně, mají však lehčí překážky, kdy je bariéra vyměněna za nízkou překážku a kladina je snížena na 0,8 m. Limit na vykonání pokusu je 120 s.

Překážky pro tuto disciplínu jsou poměrně rozměrné, proto jedna dráha zabere dvě klasické atletické dráhy. V jednom rozběhu tak mohou startovat maximálně čtyři závodníci, pokud je na stadionu 8 atletických drah. Čtyři soutěžící jsou však v rozběhu jen velmi zřídka, většinou až při mistrovstvích republiky, kde je už velký počet závodníků a je k dispozici stadion s dostatečnou dráhou. Běžnější jsou rozběhy se třemi, případně dvěma závodníky.



Obrázek 2.2: Nákres dráhy pro běh na 100 m s překážkami (převzato z [1])

Disciplína běh na 100 m s překážkami klade velké nároky na fyzickou přípravu i zručnost soutěžícího. V ČR je pouze několik desítek většinou profesionálních hasičů, kteří dosahují špičkové výkonnosti. Za nimi je však poměrně široká základna dobrovolných hasičů, kteří pravidelně objíždějí závody po celé republice. V ČR existují dvě ligové soutěže: Český pohár a Big Shock Pohár. Celkem se v roce 2014 koná 17 závodů. Disciplína je navíc součástí postupových soutěží na mistrovství republiky.

## Kapitola 3

# Současný stav

V této kapitole jsou popsána stávající řešení systémů elektronických časomír, která jsou používána k měření času v disciplínách požárního sportu.

Základními komponentami každého systému elektronické časomíry pro požární sport je startovní pistole, řídicí jednotka časomíry, terče se spínači a propojovací kabeláž.

Startovní pistol lze při požárním útoku nahradit optickou bránou, která spouští měření času při přerušení paprsku některým ze závodníků. Odstraní se tím lidský faktor startéra, který tak nemůže špatným rozhodnutím o předčasném startu poškodit družstvo. Dosažené časy jsou pak ale v průměru o 0,5 s lepší než při startování na pistol, proto se na kvalitních soutěžích optická závora nepoužívá, aby se dosažené časy na jednotlivých závodech daly lépe porovnat a uznat případné rekordy.

Řídicí jednotka je centrální bod každého systému časomíry. Jsou k ní připojeny ostatní komponenty systému, dále se zde nachází ovládací prvky a malý displej zobrazující naměřený čas. Většina dnešních systémů je řízena mikrokontrolérem a umožňuje navíc připojení velkého externího displeje a komunikaci s PC.

Většina časomír je určena pro měření času v disciplíně požární útoku. Proto jsou součástí systému pouze spínače do terčů, případně rovnou kompletní terče se spínací mechanikou. Používají se buď magnetické nebo polohové spínače. Magnetické spínače jsou levnější a umožňují jednodušší konstrukci spínací mechaniky. Bohužel mají vyšší poruchovost a pro co největší spolehlivost systému je nutné použít polohové spínače. Pokud je časomíra určena pro měření času v disciplínách běh na 100 m s překážkami nebo štafeta na 4x100 m s překážkami, používají se pro ukončení měření pokusu optické závory, které závodníci protínají na cílové čáře.

Kabeláž slouží k propojení řídicí jednotky se startovní pistolí a spínači v terčích (případně se startovními a cílovými optickými závorami). Drátové propojení je spolehlivé a lze pomocí něj např. napájet signalizační světla v terčích. Problémem je cena kabeláže, protože k terčům nebo k cílovým optickým branám je potřeba více než 100 m dlouhý kabel. V případě přenášení napájecího napětí ke světlům v terčích, musí být kabel navíc i o odpovídajícím průřezu. Dále je zde riziko prošlápnutí kabelu některým závodníkem, protože kabeláž většinou leží na zemi podél dráhy a soutěžící mají obuty tretry s ostrými hroty. Proto se již někteří výrobci snaží vyvíjet bezdrátové řešení připojení spínačů v terčích a startovní pistole.

Volitelnými komponentami systému časomíry bývají externí displej pro zobrazování změřených časů a program do počítače, který sbírá naměřené časy z řídicí jednotky časomíry a vyhodnocuje tabulky výsledků.

Následuje popis nejzajímavějších systémů z pohledu této práce.



### 3.1 Časomíra firmy Knězek, s.r.o.

Tato časomíra je určena pouze pro měření disciplíny požární útoku. Umožňuje tedy připojit pouze dva terče a startovní pistoli. Řídicí jednotka disponuje malým dvouřádkovým LCD pro zobrazování změřeného času. V terčích jsou magnetické spínače, které jsou součástí mechanismu umožňujícího nastavit sílu potřebnou ke shození terče. V nabídce jsou i nástřikové terče, kde jsou snímače hladiny vody, které signalizují nastřikání 10l vody do nádrže uvnitř terče.

Systém je dodáván se dvěma typy externích displejů. První typ se skládá ze tří řádků, z nichž první je sestaven z číslic o výšce 250 mm a další dva řádky mají číslice výšky 100 mm. Jsou použity sedmissegmentové číslice, které jsou vyrobeny z vysoce svítivých LED. Na prvním řádku se poté zobrazuje výsledný čas a na dalších dvou časy levého a pravého proudu. Displej umožňuje zobrazit časy v rozmezí 0 až 99,999 s. Třířádkový displej je na obrázku 3.1.



Obrázek 3.1: Fotografie třířádkového displeje časomíry firmy Knězek, s.r.o.

Druhý typ displeje má pouze dva řádky s velikostí čísel 100 mm. Zobrazuje časy levého a pravého terče, nevyhodnocuje tedy výsledný čas.

Výhodou tohoto systému je velký přehledný externí displej s velkou svítivostí, která zajišťuje perfektní čitelnost displeje i na přímém slunečním svitu. Mechanismus v terčích umožňuje nastavit lehčí terče pro soutěže dětí. U dospělých pak větší síla nutná k překonání závaží v terčích přispívá k větší regulérnosti soutěže, protože je tak nutné doběhnout až k čáře výstřiku a nelze se štěstím srazit terč z větší dálky.

Nevýhodami jsou zaměření pouze na požární útok, absence komunikace s PC, poruchové magnetické spínače v terčích, nutnost zvláštního napájení pro světla v terčích a především vysoká cena, která začíná u systému s dvouřádkovým displejem okolo částky 40 000 Kč.

## 3.2 Časomíra firmy LV

Firma Ing. Libora Valeše má v nabídce několik typů elektronických časomír pro požární sport, které se liší většinou počtem řádků externího displeje a výškou číslic na řádku tohoto displeje. K dispozici jsou systémy s jednořádkovým nebo dvouřádkovým displejem a se 150 mm nebo 200 mm číslicemi (viz obrázek 3.2). Dále je v nabídce samostatná řídicí jednotka, která je jinak součástí displeje.



Obrázek 3.2: Fotografie dvouřádkového displeje časomíry firmy LV

Číslice displeje jsou sedmsegmentové a jednotlivé segmenty jsou složeny z vysoce svítivých diod. Displej má rozlišení 0 až 999,99 s. Specialitou, kterou zatím žádný jiný výrobce nenabízí, jsou displeje na terče, které zobrazí závodníkovi čas, kterého dosáhl, bezprostředně po sestřiku terče.

Systém umožňuje měřit až čtyři dráhy v disciplíně běh na 100 m s překážkami nebo dvě dráhy v disciplíně požární útok. Dosažené časy jsou na externím displeji postupně přepínány a k jejich rozlišení slouží dodatečná číslice. Při požárním útoku na jednu dráhu a dvouřádkovém displeji se na horním řádku zobrazuje čas rychlejšího terče doplněný o informaci, o který terč se jedná („L“ nebo „P“). Dolní řádek pak zobrazuje výsledný čas.

Výhoda tohoto řešení spočívá v ceně, která začíná u jednořádkové časomíry se 150 mm číslicemi na 8 990 Kč a nejdražší sestava s dvouřádkovým 150 mm displejem a displeji na terče stojí 30 990 Kč.

Použité LED a především počet LED na 1 segment displeje však zapříčiňují špatnou čitelnost displeje. Vysoce svítivé diody mají moc úzký úhel vyzařování a proto je čas špatně vidět z pohledu ze strany od displeje. Navíc je použito málo diod, takže jsou číslice moc úzké vzhledem k jejich výšce, což také snižuje čitelnost displeje.

Další nevýhodou je chybějící možnost komunikace s PC. Dále pokud si zákazník objedná přímo časomíru s externím displejem, je řídicí jednotka uvnitř displeje, takže je při trénincích nutné vytahovat celou časomíru a ne jen řídicí jednotku.

### 3.3 Časomíra firmy TRV elektronik

Také tato firma má v nabídce časomíry s jednořádkovými nebo dvouřádkovými displeji, které jsou zobrazeny na obrázku 3.3. Číslice jsou opět sedmissegmentové a jsou nabízeny ve velikosti 150 a 260 mm. U jednořádkového displeje jsou nabízeny i 300 mm číslice. Segmenty tvoří vysoce svítivé LED. Řídicí jednotka je součástí displeje, lze však zakoupit i samostatný stolní model řídicí jednotky.



Obrázek 3.3: Displeje nabízené k systému časomíry firmy TRV (převzato z [5])

Systém umožňuje měřit disciplíny požární útok a běh na 100 m s překážkami. Celkem lze připojit až čtyři spínače nebo optické závory, lze tedy měřit dva paralelní požární útoky nebo čtyři dráhy při atletických disciplínách. Jako jediný výrobce má TRV elektronik v nabídce bezdrátové řešení pro připojení senzorů. Bohužel lze takto připojit jen optické závory, toto řešení je tedy použitelné jen pro účely měření běhu na 100 m s překážkami.

Z pohledu ceny jde o kompromis mezi časomírou firmy Knězek, s.r.o. a časomírou od Ing. Valeše. Na rozdíl od druhého jmenovaného systému má však lépe vyřešený externí displej, který má dostatečnou velikost i svítivost. Dále nabízí sběr naměřených časů programem v počítači přes rozhraní RS232.

Nevýhodou je umístění řídicí jednotky v externím displeji, takže je nutné na tréninku vytahovat displej. Kvůli komunikaci s PC pak musí být na soutěži displej umístěn poblíž počítače, protože rozhraní RS232 umožňuje použití maximálně 25 m kabelu.

### 3.4 Původní řešení mé časomíry

V rámci mé bakalářské práce jsem navrhl a vyrobil svůj vlastní systém časomíry [2]. Tento systém se skládá z displeje obsahujícího řídicí jednotku, startovní pistole, dvou terčů s polohovými spínači, propojovacích kabelů, záložní časomíry a programu do počítače vyhodnocujícího naměřené časy.

Displej má tři řádky se sedmissegmentovými číslicemi. Na prvním řádku, který tvoří číslice o výšce 390 mm, se zobrazuje výsledný čas. Časy levého a pravého terče se zobrazují na dalších dvou řádcích o výšce 260 mm. Segmenty tvoří vysoce svítivé LED pásky s úhlem vyzařování 120°. Rozsah měřeného času je 0 až 999,999 s. Displej je zobrazen na obrázku 3.4.



Obrázek 3.4: Fotografie displeje systému časomíry navrženého v mé bakalářské práci

Systém umožňuje měřit požární útok na jednu dráhu nebo běh na 100 m s překážkami až na čtyři dráhy. Mechanismus v terčích pro požární útok umožňuje, podobně jako u řešení od firmy Kněžek, s.r.o., nastavit sílu potřebnou pro sražení terče. Aplikace pro PC sbírá naměřené časy prostřednictvím rozhraní RS232 a automaticky vytváří výsledkové listiny. Hlavní časomíru jistí malá záložní časomíra od firmy Flajzar, s.r.o., která je paralelně připojena ke startovní pistoli a spínačům v terčích.

Díky použití LED pásek má displej velmi dobrou čitelnost i z větších úhlů pozorování. Příznivá cena pásek pak umožňuje postavit displej o větší velikosti za stále přijatelnou cenu. Automatické vyhodnocování naměřených časů zabraňuje zanesení chyby do výsledků lidským faktorem.

Řídicí jednotka je vestavěna do displeje, což se ukázalo jako nevhodné řešení. Na tréninku sice lze použít záložní časomíru, jenže potenciální zákazník většinou časomíru od firmy Flajzar, s.r.o. nevlastní, takže by se tímto zbytečně navyšovala výrobní cena systému časomíry. Dále rozhraní RS232 pro komunikaci s PC je dnes již zastaralé a většinou je nutné použít převodník na USB. Navíc maximální délka kabelu 25 m pořád příliš omezuje možnosti umístění displeje, pokud je potřeba připojit PC. Praxe dále ukázala, že časomíra o tak

velkých rozměrech je velmi nepraktická při převozu nebo při nutnosti zavěšení časomíry do výšky.

### 3.5 Zhodnocení

Všechny výše uvedené systémy mají jednu společnou vlastnost. Jsou zaměřeny na klasické provedení požárního útoku na 2 B nebo 3 B. Já žiji v oblasti Beskyd, kde je velké množství přepojovacích soutěží, které potřebují pro měření časomíru s větším počtem senzorů. Při konzultacích s potenciálními zákazníky jsem zjistil, že by o takový systém časomíry byl zájem.

Problém je, že každá taková soutěž je velmi specifická. Je tedy nutné navrhnout flexibilní modulární systém, který by umožňoval uživateli nastavit dle pravidel své soutěže počet terčů a zda daný terč měří jen mezičas, nebo výsledný čas. Dále by mělo být možné nastavit pravidla ve smyslu určení pořadí sestříknutí jednotlivých terčů, které nyní hlídají rozhodčí. Tím by se odstranila možnost lidského pochybení.

Se zvýšením počtu senzorů by se však neúnosně zvýšila cena kabeláže. Je tedy nutné navrhnout bezdrátovou komunikaci řídicí jednotky se senzory. Tím se také odstraní nebezpečí poškození komunikačních kabelů obuví závodníků. Bezdrátová komunikace by byla vhodná i pro snímání impulzů od startovní pistole.

Aby se na trénincích nemusel používat externí displej, je nutné od displeje oddělit řídicí elektroniku časomíry a vložit ji do samostatné řídicí jednotky vybavené malým LCD zobrazujícím naměřené časy. Rozhraní RS232 pro komunikaci s PC je vhodné vyměnit za USB. To však dovoluje pouze 5 m kabel, proto je potřeba mít jednotku co nejbližší počítači a s displejem komunikovat také bezdrátově. Tím by i přibyla možnost připojit více displejů, což by na některých méně přehledných soutěžích bylo také vhodné.

Tři řádky sedmissegmentových číslic vyrobené z LED pásků se osvědčily, je tedy vhodné toto řešení zachovat. Je však nutné zmenšit celkové rozměry displeje tak, aby jej bylo možné převážet osobním automobilem a bylo jej možné snáze zavěsit do vyšších míst. Proto je třeba úměrně zmenšit výšku číslic displeje.



## Kapitola 4

# Možnosti bezdrátové komunikace

Legislativa České republiky [6] umožňuje bez registrace a poplatků využít pro provoz zařízení krátkého dosahu pásma uvedená v tabulce 4.1. Z pohledu přenosu dat mezi komponentami navrhovaného systému časomíry je možné použít pásma 433,050 – 434,790 MHz, 863,000 – 870,000 MHz a 2400 – 2483,5 MHz.

V následujících podkapitolách jsou popsány obvody pracující na těchto frekvencích, které by bylo možné použít pro účely této práce. Dále jsou představeny existující komunikační protokoly a standardy pro bezdrátovou komunikaci v průmyslu.

Ozn.	Kmitočtové pásmo
a	6765 – 6795 kHz
b	13,553 – 13,567 MHz
c	26,957 – 27,283 MHz
d	40,660 – 40,700 MHz
e	138,200 – 138,450 MHz
f	433,050 – 434,790 MHz
g	863,000 – 870,000 MHz
h	2400 – 2483,5 MHz
i	5725 – 5875 MHz
j	24,000 – 24,250 GHz
k	61,0 – 61,5 GHz
l	122 – 123 GHz
m	244 – 246 GHz

Tabulka 4.1: Bezlicenční pásma pro provoz zařízení krátkého dosahu

### 4.1 Dostupné RF moduly a čipy

Na trhu jsou dostupné RF transceivery buď ve formě samostatného čipu, ke kterému je potřeba doplnit zbylé součástky, nebo rovnou v podobě modulu, který je připraven k okamžitému použití v cílové aplikaci. Pro čipy, které jejich výrobce prodává pouze samostatně, však existují i moduly od jiných výrobců, které daný transceiver používají. Zakoupit lze transceivery pro všechna bezlicenční pásma, nejpoužívanější jsou však pásma 433 a 868 MHz a 2,4 GHz.

## Moduly Aurel

V nabídce italské firmy Aurel s.p.a. lze nalézt moduly pro bezdrátovou komunikaci ve všech třech základních frekvenčních pásmech. Model XTR-7020A-4 [7] je multikanálový transceiver pracující v pásmu 433 MHz. Podporuje až sedm komunikačních kanálů, rychlost přenosu v rozmezí 9600 až 115000 bps a nastavení vysílaného výkonu od -8 do +10 dBm. Modul používá modulaci FSK (Frequency-Shift Keying). Dále obsahuje mikrokontrolér, který se stará o přijímání a vysílání paketů dat. Mechanismus tvorby paketů je před uživatelem skryt a podporuje pakety o délce až 240 B. Data se mezi modulem a uživatelským systémem přenášejí jednoduše pomocí sériového rozhraní RS232. V mikrokontroléru jsou implementovány mechanismy pro ověření bezchybného přenosu přijatých dat, díky kterým lze na volném prostranství komunikovat až do vzdálenosti 300 m. Stejně parametry má i model XTR-7020A-8 [8], který však pracuje v pásmu 868 MHz.

Pro 2,4 GHz pásmo je v nabídce model XTR VF 2.4 LP [9]. Tento modul je schopen komunikovat rychlostí až 1 Mbps. Dále podporuje až 98 komunikačních kanálů o šířce 1 MHz. Díky použité technice DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) je možné přenášet spolehlivě signál i v zarušeném prostředí. Modul používá GFSK (Gaussian FSK) modulaci. S uživatelským systémem komunikuje pomocí rozhraní SPI.

## nRF905

Obvod nRF905 [10] od firmy Nordic Semiconductor představuje řešení multikanálového transceiveru pro pásma 433, 868 a 915 MHz integrovaného do jediného čipu. Nastavení komunikace a odesílání a příjem dat probíhá před SPI rozhraní. Obvod automaticky generuje CRC a hlavičky odesílaných paketů pro zabezpečení chyb při přenosu. Dále je v čipu implementován mechanismus opětovného zasílání paketů při rozpoznání chybách.

Obvod používá modulaci GFSK, podporuje až 170 komunikačních kanálů a umožňuje nastavit výstupní výkon až na 10 dBm. Maximální rychlost komunikace je 50 kbps a dosah signálu může být na otevřeném prostranství až 1000 m.

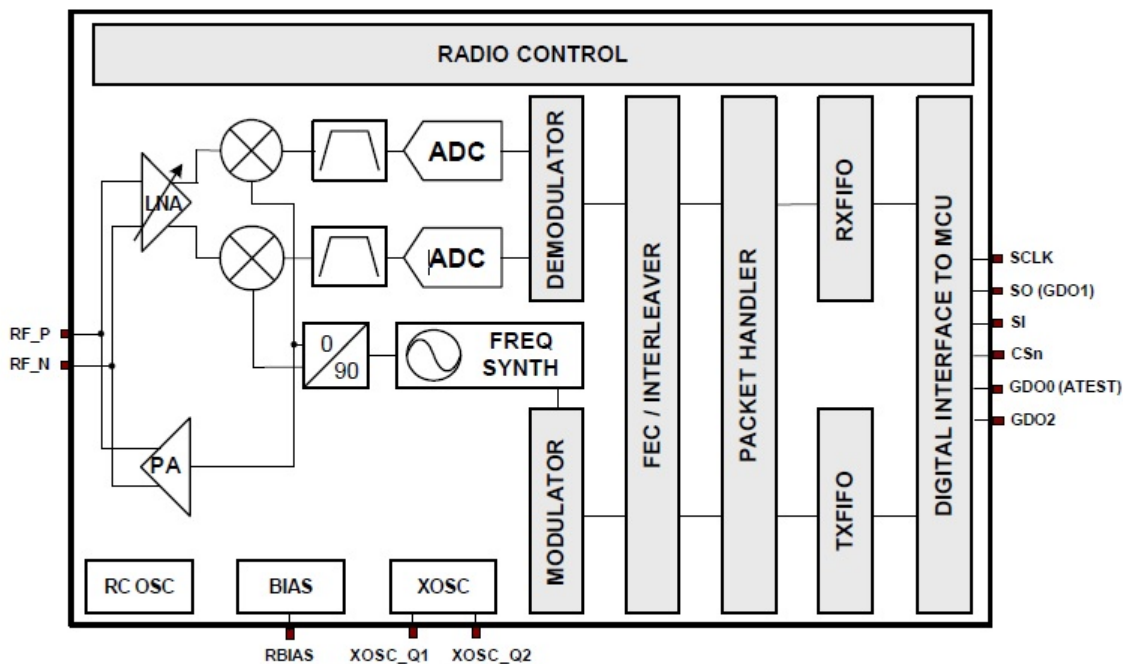
## CC1101

Také firma Texas Instruments nabízí multikanálový transceiver integrovaný do jednoho čipu. Obvod CC1101 [11] dokáže pracovat ve standardních pásmech 315, 433, 868 a 915 MHz. Mimo to jej lze naladit na libovolná pásma v rozmezí 300–348 MHz, 387–464 MHz a 779–928 MHz. Obvod dále obsahuje modem pro základní pásma, který podporuje modulace 2-FSK, 4-FSK, GFSK a MSK (Minimum-Shift Keying) a má programovatelnou přenosovou rychlost v rozmezí 0,6 až 600 kbps. Blokové schéma obvodu je na obrázku 4.1.

Čip nabízí vysokou citlivost -116 dBm pro pásmo 433 MHz a -112 dBm pro 868 MHz. Výstupní výkon lze nastavit až do +12 dBm. Dále je zde podpora pro synchronizaci bezdrátových zařízení v systému, adresaci jednotlivých zařízení, proměnnou délku paketů a zabezpečení správnosti přenášených dat pomocí CRC. Na otevřeném prostranství lze mezi dvěma zařízeními komunikovat až na vzdálenost 1000 m.

Pokud je potřeba, lze použít navíc obvod CC1190 [12], který zlepšuje citlivost u pásma 868 MHz na -118 dBm a u 915 MHz na -120 dBm. Maximální výstupní výkon poté lze nastavit až na +20 dBm resp. +27 dBm u pásma 868 MHz resp. 915 MHz.

CC1101 nabízí velké množství nastavení. K dispozici je několik kontrolních registrů,



Obrázek 4.1: Blokové schéma čipu CC1101 (převzato z [11])

kteří jsou přístupné prostřednictvím SPI rozhraní a které slouží k úpravě parametrů bezdrátové komunikace. Součástí čipu jsou dva FIFO buffery, z nichž jeden slouží pro uložení dat k odeslání a do druhého se ukládají přijatá data. K oběma bufferům lze přistupovat opět přes rozhraní SPI, pro zrychlení komunikace je k dispozici i burst režim.

## 4.2 Bezdrátové protokoly

Vybraný transceiver je potřeba nějakým způsobem ovládat, což není vzhledem k velkému množství nastavení triviální záležitost. Dále je potřeba vymyslet způsob komunikace zařízení v síti, způsob organizace sítě, funkci uzlů apod. K tomuto účelu slouží bezdrátové protokoly, které mají RF transceivery plně pod svou kontrolou a poskytují uživateli zjednodušené rozhraní pro nastavení parametrů komunikace a pro samotnou výměnu dat mezi zařízeními. Uživatel tak používá pouze funkce z API a nižší vrstvy komunikace jsou před ním skryty. Následuje popis protokolů vhodných pro potřeby této práce.

### ZigBee®

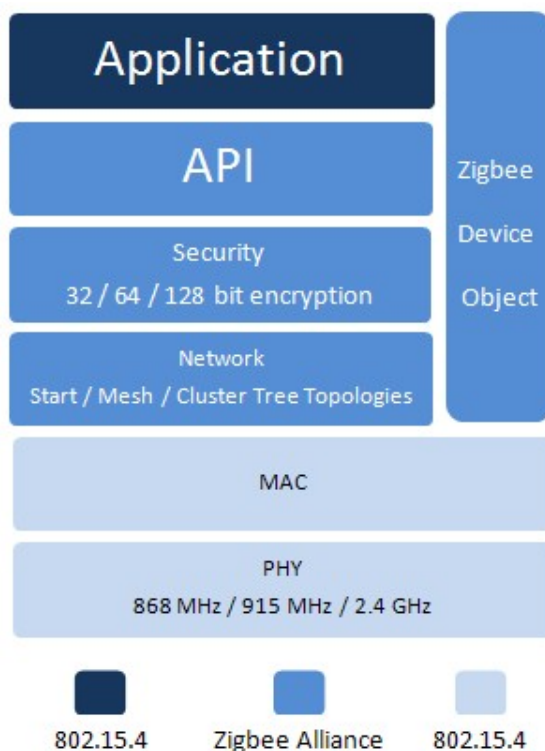
ZigBee je bezdrátová komunikační technologie postavená na standardu IEEE 802.15.4. Patří do skupiny bezdrátových sítí PAN (Personal Area Network). Na vývoji této technologie pracuje ZigBee Alliance, jejíž členy je více než 60 firem, mezi kterými jsou i přední firmy z oboru automatizace (např. Honeywell, Motorola, ABB, Siemens). ZigBee vznikl jako standard vhodný pro účely průmyslové automatizace. Je navržen jako jednoduchá a flexibilní technologie pro tvorbu bezdrátových sítí, kde není potřeba přenášet velké množství dat.

ZigBee lze použít v mnoha aplikacích v oblasti automatizace budov, spotřební elektro-



niky, počítačových periférií, průmyslové automatizace a zdravotnictví. Standard definuje tři režimy přenosu dat: periodické, nepravidelné a opakující se přenosy s požadavkem na malé zpoždění.

Celkový protokol se skládá z fyzické a MAC (Media Access Control) vrstvy, které jsou definovány standardem IEEE 802.15.4 a které specifikují přístup k přenosovému médium. Nad nimi je síťová vrstva (NWK), která realizuje připojení k síti a nejvýše je vrstva aplikační (APL) zajišťující potřebné služby. Blokové znázornění vrstev protokolu je na obrázku č. 4.2.



Obrázek 4.2: Vrstvy protokolu technologie ZigBee (převzato z [13])

IEEE 802.15.4 umožňuje použít frekvenční pásma 868 MHz, 902 až 928 MHz a 2,4 GHz a specifikuje rychlosti přenosu 20, 40 nebo 250 kbps. ZigBee však pracuje s rychlostí 250 kbps, které lze dosáhnout jen v pásmu 2,4 GHz. Ostatní pásma tedy ZigBee nepodporuje [14].

Dosah ZigBee je 10 až 50 m v závislosti na lokálních podmínkách šíření signálu. Používá se modulace O-QPSK (Offset Quadrature Phase-Shift Keying) a technika DSSS. Pro přístup k fyzickému médiumu je použita metoda CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance). Komunikační protokol je založen na přenosu datových rámců a je definován MAC vrstvou. Je podporována hvězdicová, stromová a mesh topologie.

## SimpliciTI<sup>®</sup>

Jedná se o proprietární protokol od firmy Texas Instruments pro malé bezdrátové sítě s jednoduchou topologií. Protokol lze použít buď s bezdrátovým SoC (System on Chip) řešením nebo s kombinací mikrokontrolér řady MSP430 + bezdrátový transceiver od firmy Texas Instruments.

SimpliciTI je zaměřen na co nejmenší spotřebu komunikujících zařízení, které jsou napájeny z baterií. Dále se snaží o co nejjednodušší implementaci – přeložené zdrojové soubory knihovny protokolu zabírají jen přibližně 5 kB programové paměti a API knihovny obsahuje jen šest funkcí.

Protokol je vhodný pro použití v oblastech alarmů a bezpečnostních zařízení, detektorů kouře, dálkových ovladačů, bezdrátových senzorů a automatizace domácnosti.

Dle použitého transcieveru nebo SoC lze komunikovat v pásmech 433, 868 a 915 MHz nebo 2,4 GHz. Dosah a rychlost komunikace pak odpovídá parametrům použitých zařízení. Fyzická a linková vrstva je obsluhována přímo v transcieverech, SimplicitiTI tedy tyto vrstvy neimplementuje.

Tato technologie umožňuje vytvářet menší bezdrátové sítě s přibližně 30 zařízeními, které mohou mezi sebou komunikovat Point-to-Point nebo pomocí jednoduché hvězdicové topologie.

## MiWi<sup>®</sup>

Proprietární bezdrátový protokol od firmy Microchip Technology [15]. Je určen pro aplikace vyžadující přenos jen malých objemů dat na krátkou vzdálenost. Zaměřuje se na tvorbu nízkonákladových sítí. Vychází ze standardu IEEE 802.15.4, podle kterého má implementovanou fyzickou a MAC vrstvu. Snaží se o minimalistickou implementaci, binární kód protokolu zabírá 3 až 17 kB programové paměti.

Umožňuje vytvářet sítě do 1024 uzlů, kde dva uzly mohou spolu komunikovat maximálně přes 3 prostředníky. Je podporována hvězdicová, stromová a mesh topologie. Maximální vzdálenost mezi dvěma uzly závisí na použitém hardwaru. Je možné použít pásma 433, 868 a 915 MHz a 2,4 GHz.

Protokol je spolu s vývojovým prostředím nabízen zdarma, funguje však pouze s mikrokontroléry a obvody pro bezdrátovou komunikaci od firmy Microchip Technology.

## 4.3 Shrnutí

Nejprve je třeba zvolit vhodné frekvenční pásmo. 2,4 GHz pásmo je schopné přenášet největší množství dat, avšak bez použití směrových antén má dosah jen přibližně do 50 m. Pásmo 433 MHz nabízí teoreticky největší dosah, je však dnes již velmi vytížené aplikacemi, které se především v zastavěných oblastech navzájem ruší a dosah komunikace se tak podstatně snižuje. V tomto ohledu se nabízí použít pásmo 868 MHz, které bylo legislativou ČR uvolněno až v roce 2000. Není tedy zatím tak vytíženo a pořád nabízí dosah přibližně do 1000 m. Jelikož pro potřeby bezdrátové komunikace komponent časomíry není potřeba přenášet velké množství dat a vzdálenost mezi komunikačními uzly by nikdy neměla překročit 150 m, rozhodl jsem se použít pásmo 868 MHz.

Dále je třeba zvolit obvod realizující bezdrátovou komunikaci v tomto pásmu. Modul XTR-7020A-8 od firmy Aurel nabízí dostatečný dosah 300 m, avšak jeho cena 53,91 \$

(713,18 Kč) je příliš vysoká. Transciever nRF905 od Nordic Semiconductor je schopen komunikovat až na 1000 m a moduly s tímto čipem lze koupit již od 7 \$ (140,80 Kč). Je tedy vhodným kandidátem. Čip CC1101 od Texas Instruments však nabízí lepší citlivost a větší možnosti nastavení. Přitom je jen nepatrně dražší – ceny modulů s tímto obvodem začínají okolo 7,78 \$ (156,49 Kč). Proto jsem zvolil tento čip.

Nyní zbývá jen zvolit vhodný bezdrátový komunikační protokol. Kvůli volbě 868 MHz pásma nelze použít technologii ZigBee, která pracuje jen v pásmu 2,4 GHz. Navíc má omezení dosahu na 50 m a celkově se jedná o zbytečně robustní řešení pro potřeby navrhovaného systému časomíry.

MiWi od firmy Microchip Technology se zaměřuje na menší sítě do 1024 uzlů, umí pracovat se zařízeními v pásmu 868 MHz, které jsou schopny komunikovat až do vzdálenosti 500 m. Tento protokol však lze použít jen s obvody od firmy Microchip Technology. S čipem CC1101 od Texas Instruments tedy není protokol kompatibilní.

Podobný protokol však nabízí i Texas Instruments pod názvem SimpliciTI. S CC1101 je schopen komunikovat až do 1000 m, umožňuje Point-to-Point komunikaci i jednoduché sítě do 30 uzlů s hvězdicovou topologií. Protokol má jednoduché API a v paměti programu mikrokontroléru zabírá jen okolo 5 kB. Všechny tyto vlastnosti jsou pro potřeby vyvíjeného systému více než dostačující a proto jsem se jej rozhodl použít.

V následujících podkapitolách je podrobněji popsán vybraný modul s čipem CC1101 a knihovna s protokolem SimpliciTI.

## 4.4 RF moduly s čipem CC1101

Pro fyzickou realizaci komunikace byly vybrány moduly s čipem CC1101 od firmy Texas Instruments. Na čínském portálu Alibaba.com byly zakoupeny moduly původně určené pro platformu Arduino, jejich použití je však univerzální. Vyznačují se především nízkou cenou \$8,50 a malými rozměry DPS 34x17 mm. S modulem je dodávána i externí anténa, viz obrázek 4.3.



Obrázek 4.3: RF modul pro Arduino s čipem CC1101 (převzato z [16])

S mikrokontrolérem modul komunikuje prostřednictvím SPI rozhraní, kterým se do čipu nahrávají data k odeslání a konfigurace přenosu. Opačným směrem putují přijatá data a informace o kvalitě signálu. Mimo to může modul upozornit mikrokontrolér na nastálou událost pomocí dvojice pinů GDO0 a GDO2.

Konfigurace čipu CC1101 probíhá přes konfigurační registry, kterých je celkem 46. Tento proces začíná zasláním hlavičkového bajtu z mikrokontroléru do čipu pomocí SPI. Hlavičkový bajt obsahuje  $R/\overline{W}$  bit rozhodující o čtení, či zápisu do registru, bit značící burst režim přenosu a šestibitovou adresu cílového registru v čipu. Následuje bajt s novou hodnotou registru nebo s příkazem pro čip. Opačným směrem je zaslán bajt se stavem čipu. Význam jednotlivých bitů stavového bajtu je v tabulce 4.2. Pokud bylo vyžádáno čtení registru, je na SPI zaslán jeho obsah a stavový bajt je zasílán jen po doručení hlavičkového bajtu. K registrům s navazujícími adresami lze přistupovat pomocí burst režimu, kdy je hlavičkový bajt odeslán jen jednou a poté se pouze postupně přistupuje k příslušným registrům.

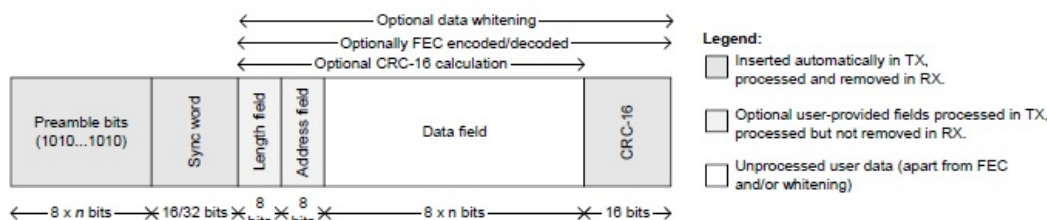
Bity	Hodnota	Význam
7	0	Čip připraven.
	1	Napájení a krystal ještě nejsou stabilní.
6:4	000	Stav komunikace IDLE.
	001	Stav komunikace Receive.
	010	Stav komunikace Transmit.
	011	Čip je připraven pro rychlé vysílání.
	100	Probíhá kalibrace frekvenčního syntetizéru.
	101	Probíhá stabilizace PLL.
	110	RX FIFO pro příjem dat přetekla.
	111	TX FIFO pro odeslání dat přetekla.
3:0		Počet přijatých bajtů v RX FIFO nebo počet volných bajtů v TX FIFO.

Tabulka 4.2: Význam bitů stavového bajtu čipu CC1101

Přenos dat přes moduly probíhá prostřednictvím dvou front typu FIFO. První slouží pro data, která se mají odeslat (TX) a druhá uchovává přijatá data (RX). Obě jsou délky 64 B a jsou přístupné pod stejnou adresou 0x3F. Zda se bude pracovat s RX nebo TX frontou, rozhoduje hodnota  $R/\overline{W}$  bitu v hlavičkovém bajtu. Pro práci s daty je také vhodný burst režim.

Čip CC1101 má vestavěnou hardwarovou podporu pro vytváření a zpracování paketů. Postačí tedy nahrát data k odeslání do TX fronty a čip dle nastavení vytvoří paket obsahující preambuli, synchronizační slova, délku paketu, cílovou adresu, samotná data a 16bitové CRC. Nad daty a CRC může být dále proveden Data Whitening a FEC (Forward Error Correction). Struktura paketu je zřejmá z obrázku 4.4.

Přijímací strana nejprve v přijatém paketu detekuje a odstraní preambuli a synchronizační slova. Poté spočítá CRC a porovná ho s CRC v paketu. Pokud se neshodují, paket zahodí a oznámí to prostřednictvím stavového bajtu příjmu. Následně se zkontroluje cílová adresa s adresou modulu a délka paketu. Pokud je vše v pořádku, jsou do RX fronty nahrána data paketu a případně jsou za ně připojeny bajty se stavem příjmu a hodnotou RSSI (Received Signal Strength Indicator). Kromě shody CRC je v bajtu se stavem příjmu i hodnota LQI (Link Quality Indicator). Z těchto bajtů tak lze vyčíst informace o síle signálu a kvalitě spojení mezi komunikujícími zařízeními.



Obrázek 4.4: Struktura paketu vytvářeného čipem CC1101 (převzato z [11])

RF modul lze nastavit na vysílací frekvenci od 300 do 928 MHz. Komunikace může probíhat rychlostí od 0,6 do 600 kbps. Jsou podporovány modulace 2-FSK, 4-FSK, GFSK a MSK. Dále je podporováno OOK (On-Off Keying) a ASK (Amplitude Shift Keying). Modul má přímou podporu pro FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) systémy, kdy je frekvenční syntetizér schopen se ustálit během pouhých  $75 \mu\text{s}$ . Pro nastavení syntetizéru na střední frekvenci přijímaného signálu lze použít systém AFC (Automatic Frequency Compensation). Dále čip disponuje funkcí CCA (Clear Channel Assessment), která automaticky vybírá momentálně volný kanál pro přenos dat. CC1101 má v režimu spánku odběr pouze  $200 \text{ nA}$  a do RX, či TX módu je schopen se přepnout během  $240 \mu\text{s}$ . Bezdrátová zařízení lze budít i přímo přes rádio pomocí funkce WOR (Wake-On-Radio).

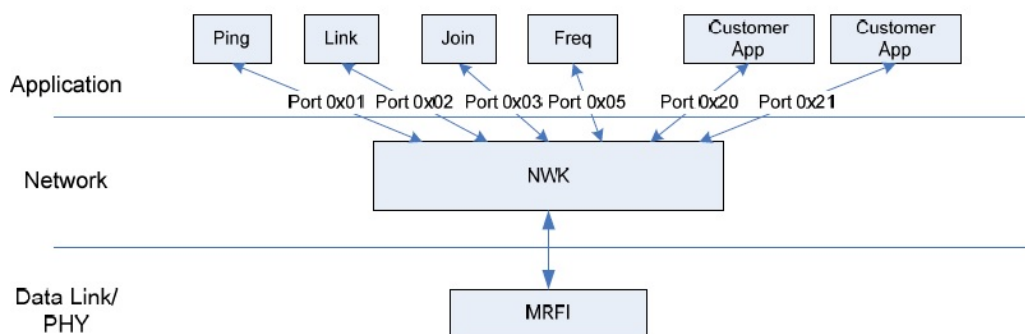
## 4.5 Knihovna SimpliCI<sup>TI</sup><sup>®</sup>

Bezdrátové moduly lze obsluhovat i pomocí vlastní jednoduché knihovny, která by řešila pouze nastavení čipu a přenos dat z/do RF modulu. Je však potřeba řešit i kolize na bezdrátových kanálech a z hlediska použití systému v reálném prostředí je nutné implementovat i FHSS, bez něhož by zařízení neprošlo certifikací od Českého telekomunikačního úřadu kvůli blokování frekvence ve volném frekvenčním pásmu. Pro tyto účely je vhodný protokol SimpliCI od firmy Texas Instruments, který slouží k pohodlnému ovládání čipů pro bezdrátovou komunikaci téže firmy. Mezi ně patří i zde použitý čip CC1101.

Knihovna s protokolem je volně k dispozici pro mikrokontroléry od TI, avšak výrobce ji umožňuje použít i s MCU od jiného výrobce. V tomto případě je nutné knihovnu naportovat na fyzické rozhraní daného mikrokontroléru. Systém vyvíjený v rámci této práce používá MCU řady PIC18F od firmy Microchip, bylo tedy nutné port provést. Náhrada instrukcí na fyzické vrstvě protokolu nebyla obtížná, problém však nastal s překladem. Použitý překladač vývojového prostředí MicroC PRO od firmy Mikroelektronika totiž neumožňuje použít reentrantní funkce, které SimpliCI ke své funkci potřebuje. Bylo tak nutné použít překladač C18 přímo od firmy Microchip. Nastal však další problém se slinkováním přeložených souborů, protože ke knihovně není dodáván Makefile a soubory knihovny obsahují křížové odkazy, kvůli kterým dopadl pokus o slinkování chybou. Po přibližně dvoutýdenním hledání chyb byl tento problém nakonec vyřešen sloučením kódu knihovny do pouhých čtyř souborů, které sice obsahují mnoho tisíc řádků kódu, ale jen takto se podařilo knihovnu úspěšně přeložit. Tato část implementace tak zabrala z celého systému nejvíce času.

## Architektura protokolu

SimpliciTI se skládá ze tří vrstev, jak je vidět na obrázku 4.5. Uživatel potřebuje doplnit pouze aplikační vrstvu, kde používá funkce pro konfiguraci komunikace a přenos dat z API knihovny. Fyzickou a linkovou vrstvu z ISO/OSI modelu nahrazuje vrstva MRFI (Minimum Radio Frequency Interface), která komunikuje přímo s RF modulem, který vykonává funkce fyzické a linkové vrstvy. Součástí knihovny je dále BSP (Board Support Package), který slouží k přizpůsobení knihovny k DPS a MCU, na kterém bude SimpliciTI provozováno. Parametry síťové vrstvy lze měnit pomocí knihovny funkce `SMPL_Ioctl()`.



Obrázek 4.5: Vrstvy protokolu SimpliciTI (převzato z [17])

## Struktura paketu

Paket má tři části: bajty dodané v HW RF modulu, které byly popsány výše v podkapitole 4.4, dále bajty vytvořené síťovou vrstvou, které obsahují např. typ paketu, typ kódování, hop count, číslo paketu apod. Poslední částí jsou samotná uživatelská data zasláná pomocí knihovny funkcí. Struktura paketu je na obrázku 4.6, význam jednotlivých položek je pak v tabulce 4.3.

PREAMBLE	SYNC	LENGTH	MISC	DSTADDR	SRCADDR	PORT	DEVICE INFO	TRACTID	App Payload	FCS
RD*	RD*	1	RD*	4	4	1	1	1	<i>n</i>	RD*

MRFI header						Network header		App payload	
MRFI header						MRFI payload			
MRFI frame									
SimpliciTI frame									

\*RD: Radio-dependent populated by MRFI or handled by the radio itself

Obrázek 4.6: Struktura paketu SimpliciTI (převzato z [17])

Položka	Význam	Poznámka
PREAMBLE	RF synchronizace	Vkládá RF čip.
SYNC	RF synchronizace	Vkládá RF čip.
LENGTH	Délka paketu v bajtech	Při odesílání vkládá knihovna.
MISC	Pole pro obecné použití	HW závislé na RF čipu, nepovinné.
DSTADDR	Cílová adresa	Vkládá knihovna.
SRCADDR	Zdrojová adresa	Vkládá knihovna.
PORT	Číslo komunikačního portu	Vkládá knihovna.
DEVICE INFO	Informace o RF modulu a knihovně	Vkládá knihovna.
TRACTID	Identifikace transakce	Vkládá knihovna.
APP PAYLOAD	Uživatelská data	Vkládá knihovna, $0 \leq n \leq 50$ .
FCS	Frame Check Sequence	Většinou CRC vložené RF čipem.

Tabulka 4.3: Význam položek SimpliTI paketu

## API

SimpliTI se snaží o minimalistické API, které zapouzdřuje síťovou funkcionalitu a umožňuje uživateli soustředit se přímo na svou aplikaci s bezdrátovou komunikací. API poskytuje prostředky pro inicializaci komunikace, navázání spojení mezi bezdrátovými zařízeními, peer-to-peer komunikaci a správu RF zařízení. Následuje popis jednotlivých funkcí základního API:

- `smplStatus_t SMPL_Init(uint8 (*pCB)(linkID))`

Tato funkce provede inicializaci SPI modulu mikrokontroléru tak, aby bylo možné komunikovat s RF modulem. Následně provede inicializaci RF čipu a síťové vrstvy protokolu. Jako parametr je předán ukazatel na callback funkci, která je volána při každém příjmu dat.

- `smplStatus_t SMPL_Link(linkID_t *linkID)`

Funkce se pokusí navázat spojení jako klient s naslouchajícím zařízením (server). Pokud od protistrany dorazí potvrzení, je identifikátor navázaného spojení předán do `linkID`, který slouží pro další komunikaci mezi spojenými zařízeními. Volání této funkce není blokující, po vypršení časového limitu vrací funkce chybový status a aplikace se může o navázání spojení pokusit znovu.

- `smplStatus_t SMPL_LinkListen(linkID_t *linkID)`

Párová funkce k `SMPL_Link()`. Z pozice serveru čeká na příchozí pokus o spojení od klienta. Spojení se naváže pouze s prvním rozpoznaným klientem. Lze navazovat více spojení, každé však v samostatném volání této funkce. Opět se jedná o neblokující funkci s časovým limitem. Po navázání spojení je jeho identifikátor vrácen přes `linkID`.

- `smplStatus_t SMPL_Send(linkID_t lid, uint8 *msg, uint8 len)`

Tato funkce pošle zprávu předanou ukazatelem `msg` o délce `len` do zařízení, které je v navázaném spojení `lid`. Funkce po odeslání dat vrací informaci o stavu přenosu. Maximální délka dat je omezena velikostí FIFO použitého RF čipu.

- `smplStatus_t SMPL_Receive(linkID_t lid, uint8 *msg, uint8 *len)`

Volání této funkce zkontroluje paketový buffer, zda obsahuje zprávu od zařízení v navázaném spojení `lid` a pokud taková zpráva existuje, vrací nejstarší z nich spolu s její délkou. Pakety se do bufferu nahrávají v callback funkci volané z vlákna přerušení při každém příjmu dat z RF modulu. `SMPL_Receive()` s RF modulem nepracuje, pouze kontroluje paketový buffer.

- `void SMPL_Ioctl(ioctlObject_t object, ioctlAction_t action, void *val)`

Funkce se používá pro změnu nastavení RF modulu. Měnit lze např. přenosovou frekvenci modulu, šifrovací klíč, adresu zařízení apod.

## Další vlastnosti SimpliCI

Kromě CCA a FHSS nabízí SimpliCI možnost šifrování komunikace a detekci podezřelých zařízení, které lze vyloučit ze sítě. Knihovna dále umožňuje vytváření jednoduchých sítí s peer-to-peer nebo hvězdicovou topologií. Zařízení mohou být typu Access Point (AP), Range Extender (RE) nebo End Device (ED). AP zařízení je centrální bod sítě a může v ní být pouze jedno. Všechny ostatní zařízení komunikují s AP. RE je používán pro zvýšení dosahu sítě, zařízení automaticky přeposílá všechny pakety, které obdrží. Koncové zařízení provádí funkci danou aplikační vrstvou a komunikují buď mezi sebou nebo s AP.



## Kapitola 5

# Návrh modulárního systému časomíry

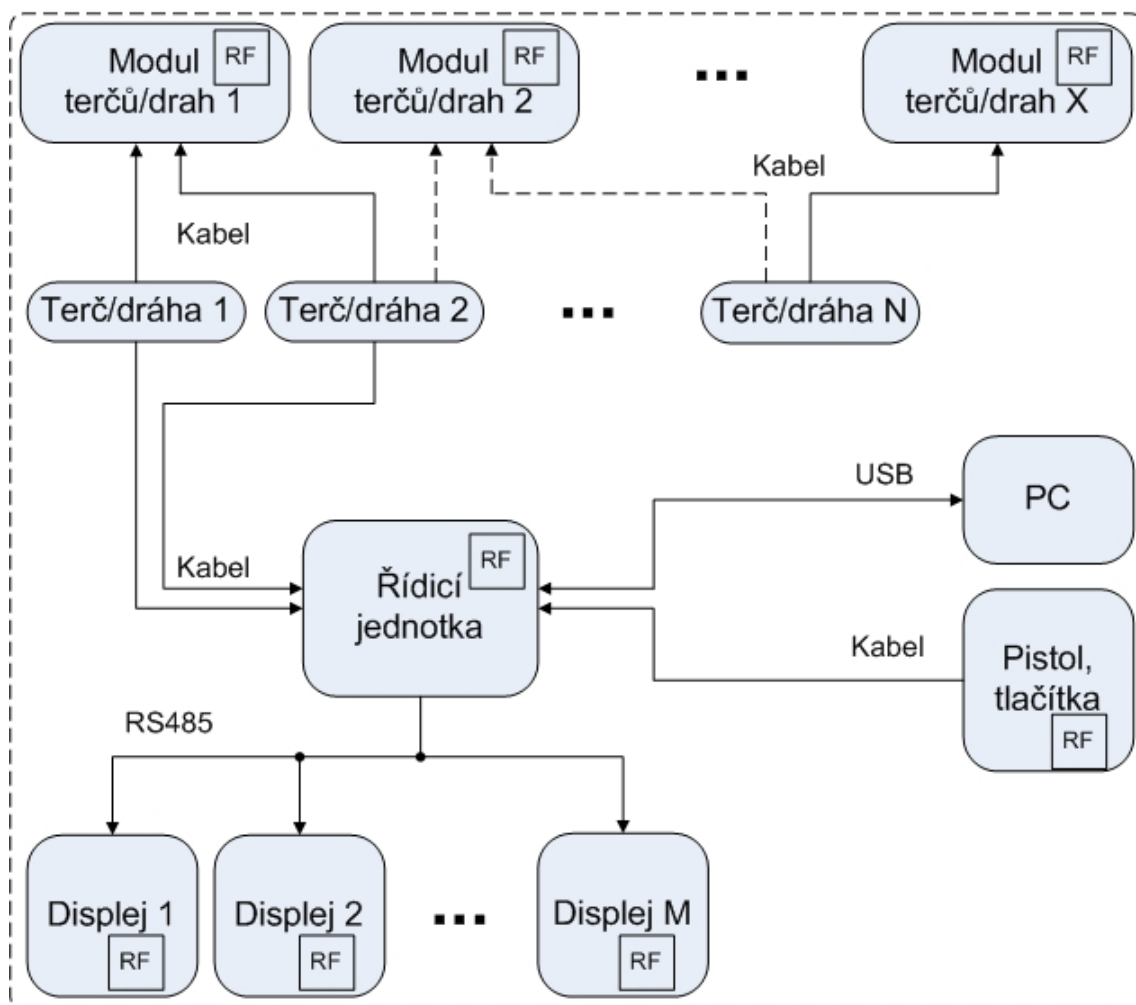
V této kapitole je představen návrh systému časomíry pro požární sport s ohledem na modularitu a flexibilitu systému pro použití při různých typech přepojovacích soutěží v požárním útoku. Po uvedení celkového schéma systému časomíry následuje detailní popis hlavní řídicí jednotky časomíry, ovládání displeje, bezdrátového modulu terčů/optických závor a bezdrátového modulu startovní pistole.

Na obrázku 5.1 je znázorněno schéma systému z nejvyššího pohledu. Centrálním bodem systému je hlavní řídicí jednotka, která obstarává komunikaci se všemi ostatními komponentami systému. Zde se provádí samotné měření času, který je poté vyhodnocen a rozeslán na externí displeje a do počítače. Jednotka obsahuje malý informační alfanumerický LCD, lze ji tedy používat i bez připojení externího displeje nebo PC. S komponentami systému může jednotka komunikovat buď pomocí drátových spojů zobrazených ve schématu nebo pomocí bezdrátových modulů. Komponenty schopné komunikovat bezdrátově mají ve schématu značku „RF“.

Kvůli zpětné kompatibilitě se systémem časomíry navrženým v mé bakalářské práci [2], je ponechána možnost připojit terče (či optické závory), startovní pistoli a konzoli s ovládacími tlačítky pomocí klasické kabeláže. Taktéž byla ponechána možnost napájet signalizační světlo terčů přímo z řídicí jednotky časomíry. Aby tyto komponenty byly schopny komunikovat bezdrátově, musí se k nim připojit bezdrátové moduly, jejichž návrh je popsán v dalších podkapitolách.

Externí displej je nyní oddělen od hlavní řídicí jednotky. Díky tomu není potřeba provozovat displej např. na tréninku, kdy postačí malé LCD na hlavní řídicí jednotce. Dále to umožňuje obsluhovat více externích displejů, které by našly využití na soutěžích, kde je problém umístit jeden displej tak, aby na něj bylo vidět ze všech míst na trati. Navíc je tak možné umístit na terče displeje podobně, jako to nabízí systém časomíry od firmy LV popsáný v podkapitole 3.2.

Řídicí jednotka může s externími displeji komunikovat buď pomocí vestavěných bezdrátových modulů nebo prostřednictvím sériové sběrnice RS485. Dvojí možnost komunikace je zavedena z důvodu zajištění větší flexibility z pohledu požadavků potenciálního zákazníka. Např. pokud zákazník požaduje jen základní systém se dvěma terči připojenými klasickou kabeláží a jedním externím displejem, bylo by zbytečné používat bezdrátové moduly jen pro komunikaci s displejem. RS485 umožňuje komunikovat až na vzdálenost 1200 m, zvládá obsluhovat až 31 zařízení připojených na sběrnici a spojení lze realizovat pomocí levné



Obrázek 5.1: Schéma modulárního systému časomíry

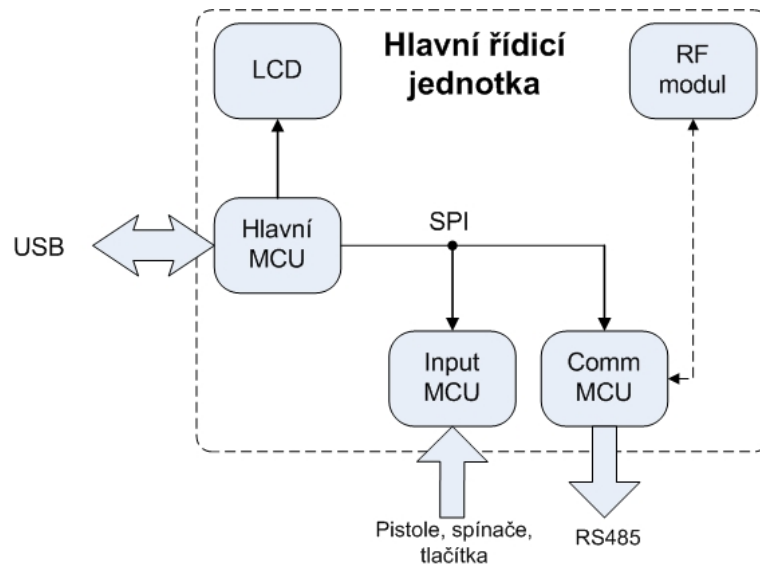
kroucené dvoulinky.

Součástí systému je aplikace pro PC, která s časomírou komunikuje pomocí rozhraní USB. Aplikace sbírá naměřené časy, které následně vyhodnocuje a automaticky tvoří výsledkové tabulky. Dále umožňuje nastavit profil měření dle pravidel dané soutěže – např. počet terčů, posloupnost sražení terčů apod.

## 5.1 Hlavní řídicí jednotka

Schéma hlavní řídicí jednotky systému časomíry je na obrázku 5.2. Jednotka je rozdělena na několik podsystémů řízených samostatným mikrokontrolérem. Dalo by se použít i řešení s méně mikrokontroléry, počítá se však s tím, že systém se bude nabízet zákazníkům ve více variantách, které se budou lišit právě přítomností, či nepřítomností MCU řídicích daný podsystém. Mikrokontroléry mezi sebou komunikují prostřednictvím sběrnice SPI.

Hlavní MCU plní na sběrnici roli „master“. Stará se o koordinaci podsystémů časomíry. Provádí se zde vlastní měření času. Přímo k MCU je připojen informační LCD, na kterém



Obrázek 5.2: Schéma řídicí jednotky systému časomíry

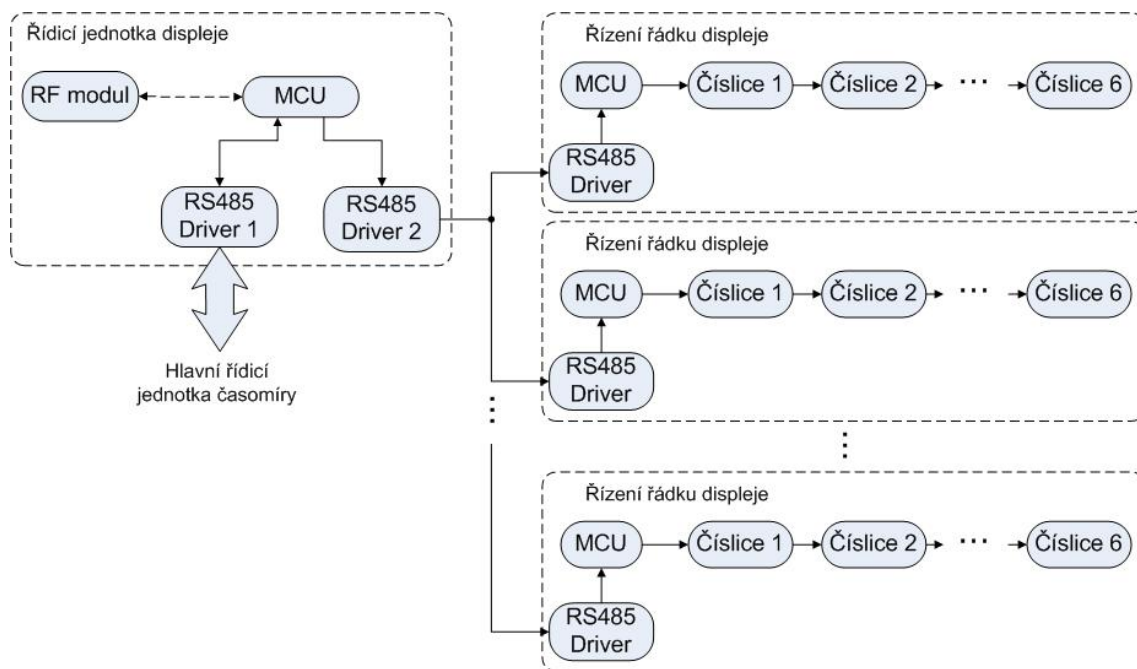
se zobrazují informace o stavu časomíry, měřených časech a menu systému. Menu lze ovládat pomocí numerické počítačové USB klávesnice připojené k MCU. Prostřednictvím USB mikrokontrolér dále komunikuje s programem v PC.

Input MCU zpracovává signály od spínačů terčů či optických závor v cíli drah, startovní pistole a tlačítek pro restart a zastavení měření času. Je v systému jen kvůli kompatibilitě se starým systémem časomíry. Pokud si zákazník objedná časomíru s bezdrátovým řešením, nemusí být tento mikrokontrolér připojen.

Comm MCU se stará o komunikaci s displeji přes sběrnici RS485 a pokud je k němu připojen RF modul, obstarává bezdrátovou komunikaci se zbylými komponentami systému. Opět pokud má zákazník zájem jen o tréninkovou časomíru bez externího displeje a nepotřebuje bezdrátové řešení připojení senzorů, je možné tento MCU vynechat.

## 5.2 Řízení externího displeje

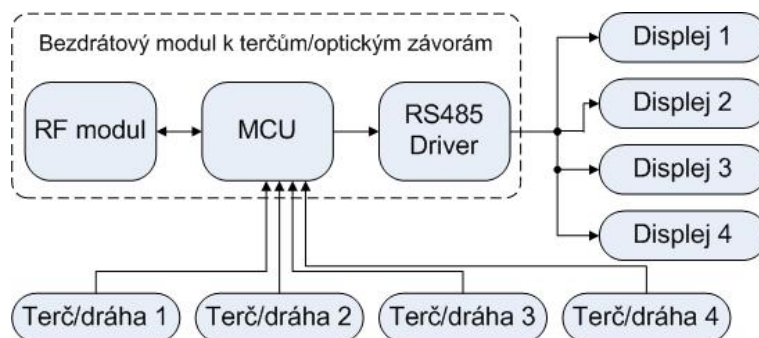
Na obrázku 5.3 je schéma řízení jednoho externího displeje. Řídicí jednotka displeje obstarává komunikaci s hlavní řídicí jednotkou časomíry, která může probíhat buď přes sběrnici RS485 nebo pomocí bezdrátového modulu. Každý řádek displeje je pak obsluhován samostatnou deskou plošných spojů, se kterou řídicí jednotka displeje komunikuje opět pomocí sběrnice RS485. Díky tomuto řešení lze jednoduše zvyšovat počet řádků displeje až do počtu 31. Jedna DPS řídicí zobrazování na řádku může obsluhovat až šest sedmissegmentových číslic.



Obrázek 5.3: Schéma řízení displeje s proměnným počtem řádků

### 5.3 Bezdrátový modul pro komunikaci s terči/optickými závory

Aby mohly terče či optické závory komunikovat s časomírou bezdrátově, je nutné k nim připojit bezdrátový modul, jehož schéma je na obrázku 5.4. Mikrokontrolér zpracovává signály ze spínačů v terčích nebo od optických závor a tyto informace posílá prostřednictvím RF modulu do hlavní řídicí jednotky časomíry. Zpět může obdržet informaci o dosaženém čase, kterou odešle pomocí sběrnice RS485 na příslušný displej terče či dráhy.



Obrázek 5.4: Schéma bezdrátového modulu pro komunikaci s terči/optickými závory

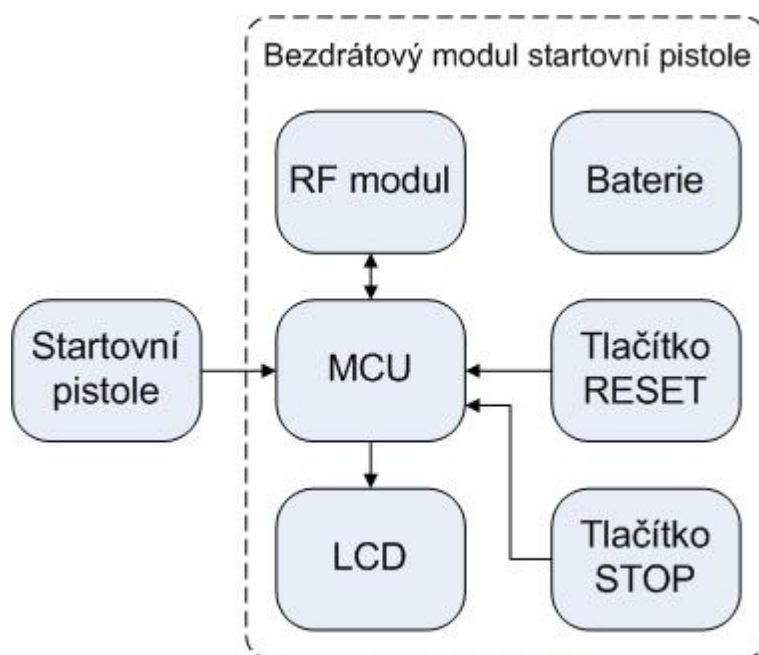
Při použití tohoto řešení samozřejmě nelze napájet signalizační světla terčů přímo z hlavní řídicí jednotky časomíry. Proto je nutné připojit k modulu autobaterii.

Jeden bezdrátový modul může obsluhovat až čtyři terče/dráhy, modulů však může být více. Lze např. zapojit dva moduly, kdy každý obsluhuje dva terče. Což je vhodné pro

soutěže, kde jsou dvě dvojice terčů ve větší vzdálenosti od sebe. Lze tedy flexibilně pokrýt požadavky daného závodu.

## 5.4 Bezdrátový modul startovní pistole

Poslední bezdrátovou komponentou systému časomíry je modul pro bezdrátovou komunikaci se startovní pistolí. Schéma modulu je na obrázku 5.5. Jedná se zároveň o jakýsi dálkový ovladač časomíry se základními ovládacími prvky. Pomocí tlačítka „STOP“ lze zastavit probíhající měření a tlačítkem „RESET“ se časomíra vynuluje. K modulu se připojuje klasická startovní pistole, jejíž sepnutí monitoruje mikrokontrolér bezdrátového modulu a tuto informaci přeposílá do hlavní řídicí jednotky prostřednictvím RF modulu.



Obrázek 5.5: Schéma bezdrátového modulu startovní pistole

Součástí modulu startovní pistole je malý informační displej typu LCD, který zobrazuje startérovi stav časomíry, informace o synchronizaci a sílu signálu. Dále je v modulu zabudován malý akumulátor, který napájí celý modul.

## Kapitola 6

# Implementace hlavní řídicí jednotky

Tato kapitola pojednává o implementaci hlavní řídicí jednotky systému elektronické časomíry. Je rozebrána volba vhodného mikrokontroléru, realizace SPI sběrnice na desce plošných spojů (DPS) jednotky, zapojení obvodu jednotky a algoritmus řízení časomíry.

### 6.1 Mikrokontrolér

Hlavní řídicí jednotka využívá celkem tři mikrokontroléry spojené sběrnici SPI, proto každý mikrokontrolér musí disponovat modulem pro synchronní sériové rozhraní. Pro přesnější měření času je vhodné, aby byl k dispozici 16bitový čítač/časovač. Jednotka dále komunikuje s PC pomocí USB rozhraní, mikrokontrolér jej tedy musí také obsahovat. Pro signály od tlačítek a spínačů je potřeba minimálně osm samostatných vstupů a pro signalizační diody tři výstupy. Dalších šest výstupů je potřeba pro řízení informačního LCD. Komunikace s externím displejem probíhá buď přes RS485, nebo přes RF modul. První varianta potřebuje UART modul, druhá další synchronní sériový modul pro SPI. Vzhledem k tomu, že je použita knihovna `SimpliciTI`, měla by mít paměť programu alespoň 30 KB.

Vhodné mikrokontroléry nabízí například firma Texas Instruments v řadě MSP430, použít lze i řadu PIC18F od firmy Microchip nebo řadu S08 od firmy Freescale. Výše uvedené požadavky splňují mikrokontroléry MSP430F5510, PIC18F47J53 a MC9S08JM32, jejichž sledované parametry jsou v tabulce 6.1.

Výběr mikrokontroléru ovlivnilo i vybavení, které mám k dispozici. Vlastním ISP programátor a vývojové prostředí MikroPascal PRO for PIC pro čipy řady PIC18F. Už jen z toho důvodu jsem preferoval PIC18F47J53. Mimo to nabízí z uvedených modelů nejlepší parametry. Tento mikrokontrolér je vhodný i pro použití v ostatních modulech systému, lze tedy využít slevu při objednání 10 kusů, kdy je i přijatelná cena.

Zajímavá vlastnost tohoto MCU je podpora tzv. přemapovatelných pinů. Celkem je k dispozici 25 pinů, kterým lze pomocí konfiguračních registrů přiřadit libovolnou funkci sekundárních modulů. Primární moduly (EUSART1, SPI1, ...) mají piny přiřazeny pevně a jejich funkce je sdílena s jinými pevně danými funkcemi tak, jak to je běžné u většiny mikrokontrolérů. Pokud je však potřeba použít sekundární modul (EUSART2, SPI2, ...), lze funkci jeho pinů přiřadit libovolnému přemapovatelnému pinu. To velmi ulehčuje návrh obvodů s těmito MCU, protože lze posunout piny tak, aby se cesty na DPS co nejméně křížily a navíc lze docílit i jisté variability použití již hotové DPS. Například tak, že se

	Požadavek	MSP430F5510	PIC18F47J53	MC9S08JM32
I/O piny	17	31	34	37
Moduly pro SPI	2	2	2	2
UART moduly	1	2	2	2
USB modul	2.0	2.0	2.0	2.0
Čítače/časovače	1 x 16bit	4 x 16bit	4/4 x 16bit/8bit	2 x 16bit
Max. frekvence	–	25 MHz	48 MHz	48 MHz
FLASH	30 KB	32 KB	128 KB	60 KB
RAM	–	6 KB	3,8 KB	4 KB
Napájení	–	1,8 – 3,6 V	1,8 – 5,5 V	2,7 – 5,5 V
Cena s DPH	–	132,858 Kč	145,769 Kč	114,660 Kč
Cena s DPH nad 10 ks	–	99,123 Kč	105,794 Kč	113,619 Kč

Tabulka 6.1: Parametry vybraných mikrokontrolérů

nepoužité piny vyvedou na záložní konektor a v případě potřeby lze aktivovat doposud nepoužívaný modul a přiřadit mu zatím nepoužité piny z konektoru.

## 6.2 SPI sběrnice

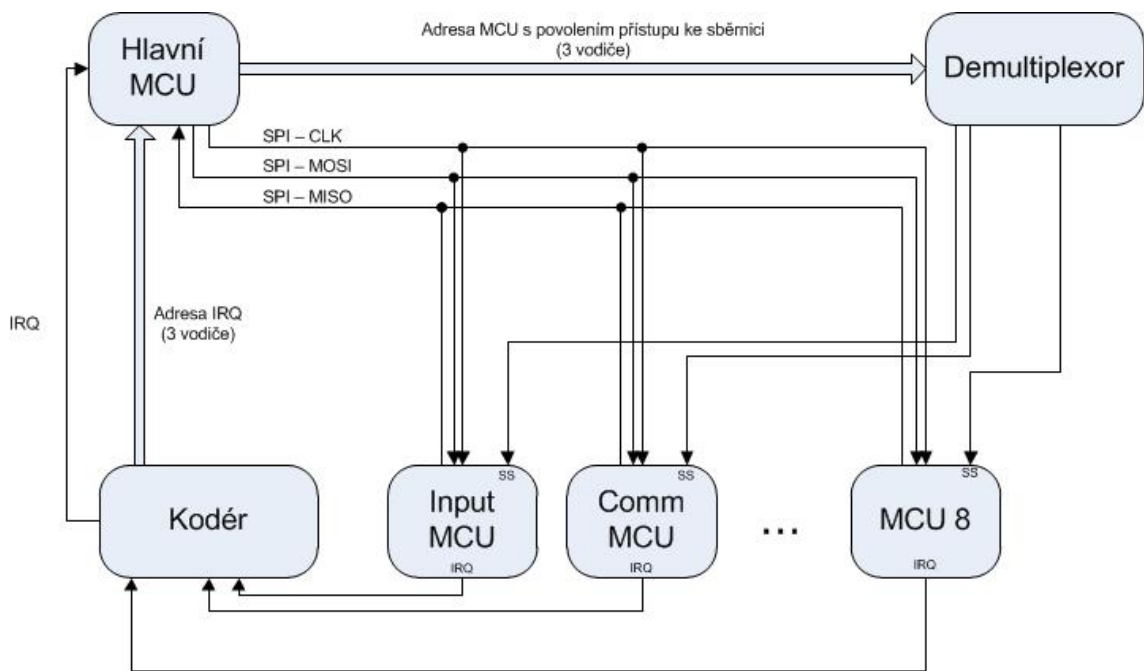
Komunikace mezi mikrokontroléry řídící jednotlivé subsystémy hlavní řídicí jednotky je realizována pomocí sběrnice SPI. Blokové schéma zapojení sběrnice je na obrázku 6.1. Demultiplexor SN74HC138D slouží k výběru slave MCU, se kterým chce komunikovat master. Kodér SN74HC148D sbírá žádosti o komunikaci od slave mikrokontrolérů. Žádost přeposílá do hlavního MCU, spolu s adresou zařízení, které žádost odeslalo. V této implementaci je potřeba obsluhovat pouze dvě slave zařízení, kapacita kodéru a demultiplexoru však umožňuje připojit až osm MCU.

Pokud chce některý ze slave mikrokontrolérů komunikovat s hlavním MCU, nastaví svůj signál IRQ do log. 0 (pasivní úroveň je zde log. 1). Priorita žádostí od jednotlivých MCU je dána zapojením do kodéru, který je prioritní a plní funkci 8-to-3. Jakmile kodér přijme signál od alespoň jednoho MCU, nastaví svůj signál IRQ, který vyvolá v hlavním mikrokontroléru přerušení, v jehož obsluze je z kodéru vyčtena adresa zařízení, které chce komunikovat. Hlavní MCU následně nastaví na demultiplexoru vybranou adresu, čímž se aktivuje signál SS pro vybrané zařízení (aktivní v log. 0) a poté již může začít komunikace mezi mikrokontroléry.

## SPI protokol

Pokud chce posílat data slave zařízení, proběhne komunikace dle protokolu na obrázku 6.2. Nejprve master odešle Start byte, který potvrdí slave zařízení, že může začít zasílat data. Po přijetí tohoto bajtu deaktivuje slave svůj IRQ signál a odešle informaci o počtu datových bajtů, které chce zaslat. Master poté posílá Data request, na který mu slave odpovídá datovým bajtem. Protokol s vyžádáním dat je zde použit z toho důvodu, že master provádí časově kritické operace a nemusel by stihnout zpracovat příchozí data. Zároveň je však





Obrázek 6.1: Blokové schéma zapojení sběrnice SPI

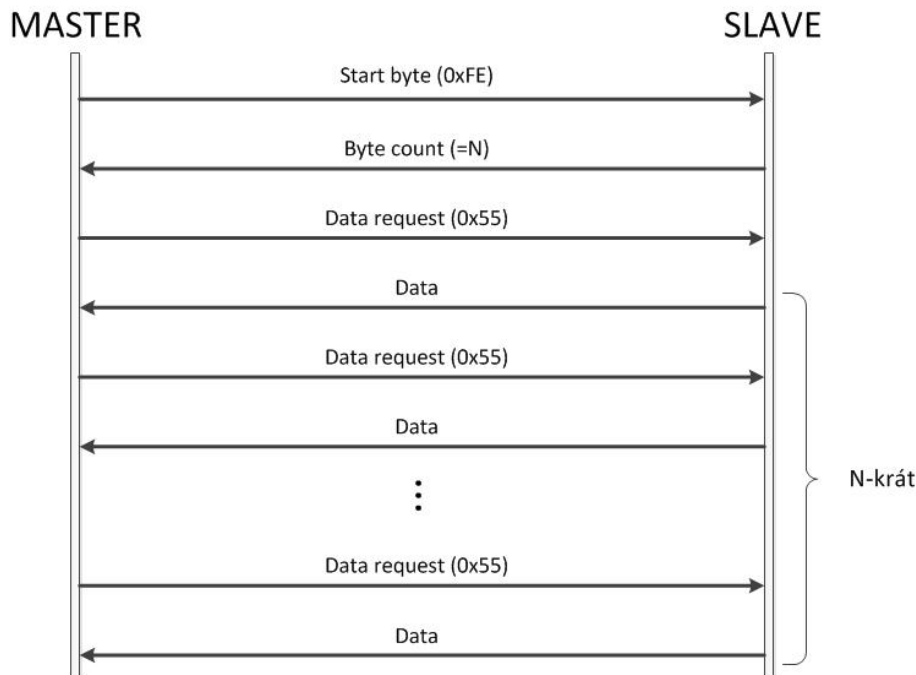
ošetřeno, aby byly signály od pistole a terčů/závor zpracovány v čase pod 1 ms a nebyla tak ohrožena přesnost měření.

Při komunikaci v opačném směru zasílá bajty jen master. Tento směr je použit jen pro komunikaci s Comm MCU, kdy hlavní mikrokontrolér posílá informace o dosažených časech pro odeslání na externí displej. Zde již není potřeba potvrzování příjemcem, protože slave MCU čekají na příkazy a data od master MCU. Přesný protokol komunikace se řídí podle prvního bajtu Command. Většinou se posílá pouze tento bajt, protože je potřeba poslat jen nějaký příkaz bez dat. Význam hodnot bajtu Command je v tabulce 6.2. Pokud se však přenáší i informace o změřeném čase, postupuje se dle protokolu na obrázku 6.3. Bajt Display row ID informuje o řádku displeje, kde se má čas zobrazit. Následně se přenáší čtyři bajty, ve kterých je zakódován čas.

Kód příkazu	Význam
0xFF	Přenos dat
0xFD	Start měření
0xFC	Zastavení měření
0xFB	Reset
0xFA	Svítivost „+“
0xF9	Svítivost „-“

Tabulka 6.2: Příkazy pro SPI komunikaci mezi hlavním MCU a Comm MCU





Obrázek 6.2: SPI komunikace slave → master

### 6.3 Detaily zapojení

Na DPS hlavní řídicí jednotky jsou celkem tři napěťové domény. Přímo z napájecího adaptéru přichází 12 V napětí, které je použito k napájení světel v terčích, pokud je využíváno kabelové spojení. Případně jím jsou napájeny optické závory při atletických disciplínách.

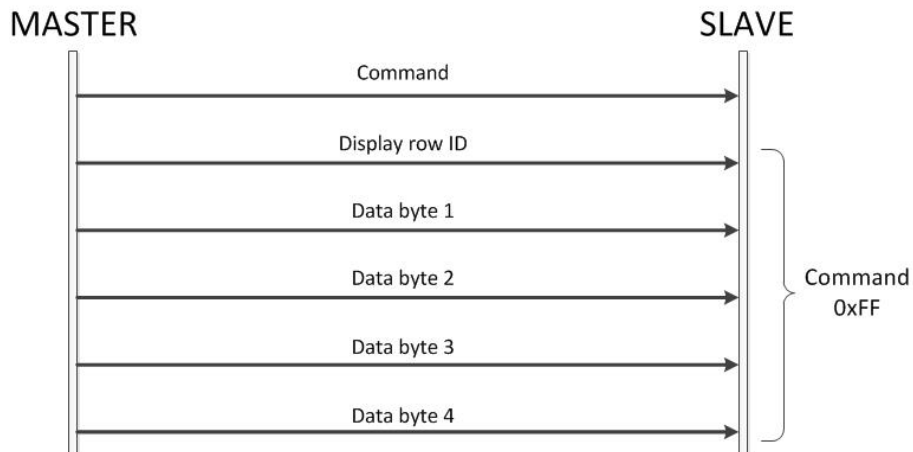
Druhá doména je tvořena 5 V napěťovým stabilizátorem LM340S-5.0 a používá se kvůli optočlenům, které toto napětí potřebují ke své funkci, a pro napájení informačního LCD. O napětí ve třetí doméně se stará 3,3 V stabilizátor LD1117DT33 a je jím napájena všechna zbylá elektronika.

Dále následuje popis zapojení jednotlivých subsystémů hlavní řídicí jednotky a je popsána funkce jejich mikrokontrolérů.

#### Mikrokontrolér pro vstupní signály

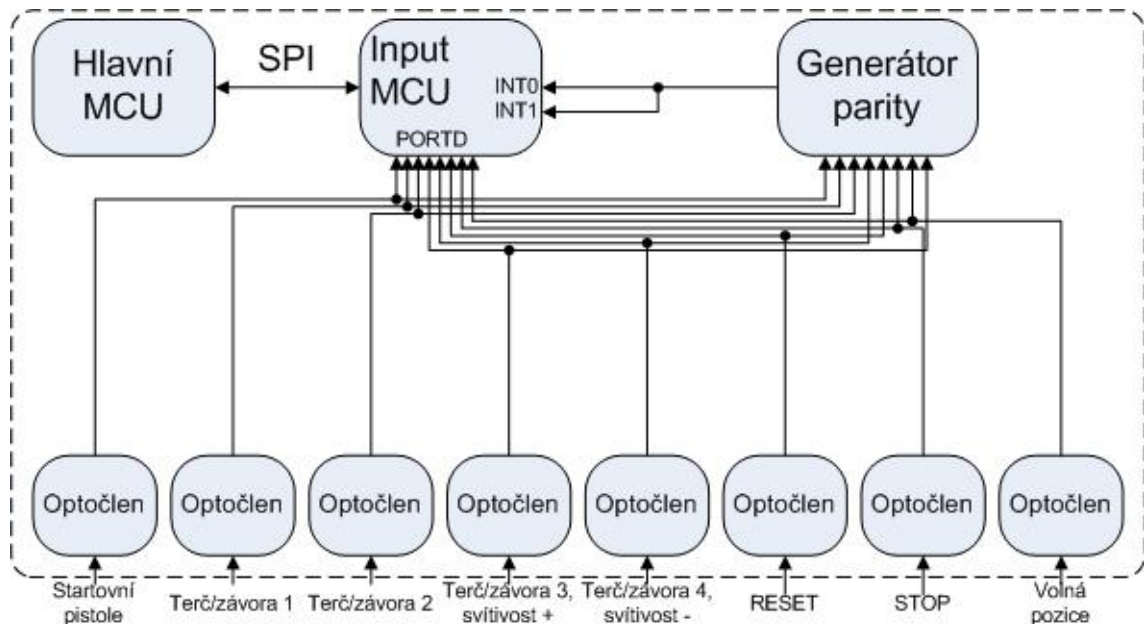
Input MCU zpracovává signály přicházející z pistole, terčů/optických závor a ovládacích tlačítek. Všechny tyto komponenty uzavírají okruh napájený 12 V napětím. Uzavřením okruhu dojde k rozsvícení diody příslušného optočlenu H11L1, čímž sepne galvanicky oddělený obvod, který pošle do vstupu mikrokontroléru 5 V signál (log. 1). MCU je napájen napětím 3,3 V, avšak má vstupy tolerující 5 V. Všech osm vstupních signálů je připojeno na port D (bity RD0 až RD7).

Problém je, že mikrokontrolér disponuje pouze sedmi piny, od kterých lze vyvolat externí přerušování. Toto je vyřešeno zapojením výstupů optočlenů navíc do paritního generátoru CD74AC280M. Původní funkcí generátoru je doplnění paritního bitu k devíti vstupním bitům. Obvod tedy vyhodnotí počet log. 1 na svém vstupu a poté změní hodnotu svého výstupu tak, aby byl součet log. 1 na vstupu a výstupu sudý nebo lichý (obvod má dva



Obrázek 6.3: SPI komunikace master → slave

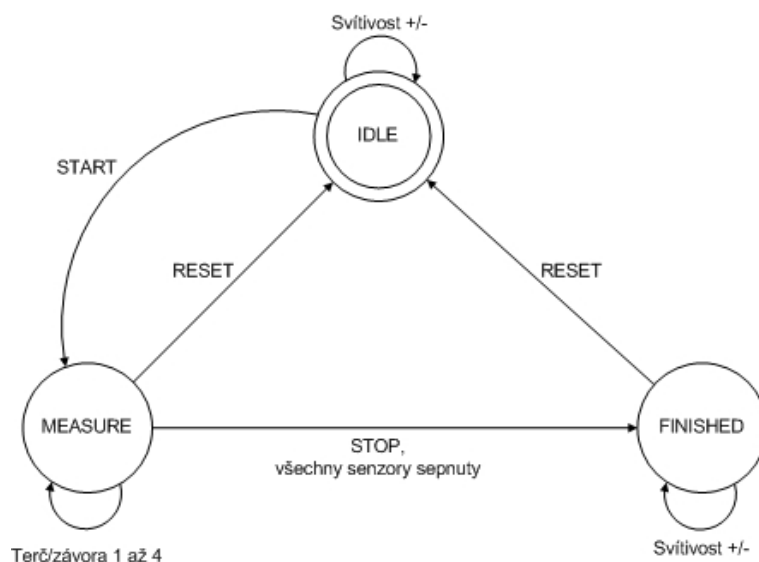
výstupy –jeden pro lichou, druhý pro sudou paritu). Z podstaty funkce generátoru pak vyplývá, že změní svůj výstup při každé změně na vstupu. Této vlastnosti se využívá pro vyvolání přerušení v mikrokontroléru. Výstup generátoru je připojen na dva vstupy MCU, které mohou vyvolat externí přerušení. Jedno přerušení je generováno na vzestupnou a druhé na sestupnou hranu. V obsluze přerušení se poté přečte hodnota na portu D, čímž se identifikuje signál, od kterého bylo přerušení vyvoláno. Blokové schéma zapojení je na obrázku 6.4. Pokud se měří jen na dva terče/závory, mohou sloužit vstupy od terčů/závor 3 a 4 pro regulaci svítivosti externích displejů.



Obrázek 6.4: Blokové schéma zapojení Input MCU

Zpracování vstupních signálů je řízeno konečným automatem (KA), jehož graf přechodů je na obrázku 6.5. V počátečním stavu IDLE mikrokontrolér reaguje pouze na signál od startovní pistole a na stisk tlačítek pro úpravu svítivosti externích displejů. Po výstřelu z pistole se KA dostane do stavu MEASURE, což znamená, že probíhá měření. Tady se zpracovávají pouze signály od terčů, či optických závor. Pokud dorazí signály od všech měřených senzorů, nebo je měření ukončeno tlačítkem STOP, přejde se do stavu FINISHED. Případně se řízení dostane do počátečního stavu tlačítkem RESET. Ve stavu FINISHED je měření dokončeno a časomíra zobrazuje změřené časy. Aby mohlo být zahájeno nové měření, je potřeba uvést KA do stavu IDLE tlačítkem RESET. Informace o vyskytnutých událostech se přeposílají přes SPI sběrnici protokolem uvedeným v podkapitole 6.2. Kódová slova pro hlavní MCU jsou uvedena v tabulce 6.3.

Zákmity tlačítek a připojených senzorů jsou řešeny v softwaru. Jakmile je rozpoznán signál, který lze v daném stavu automatu přijmout, je provedena odpovídající akce a signál se nadále ignoruje, dokud se automat nedostane do stavu, kdy jej lze znovu přijmout. Např. pokud je KA ve stavu MEASURE, může přijmout signál od terče 1 pouze jednou. Mikrokontrolér na něj bude znovu reagovat až po dokončení nebo zrušení aktuálního měření a novém výstřelu ze startovní pistole.



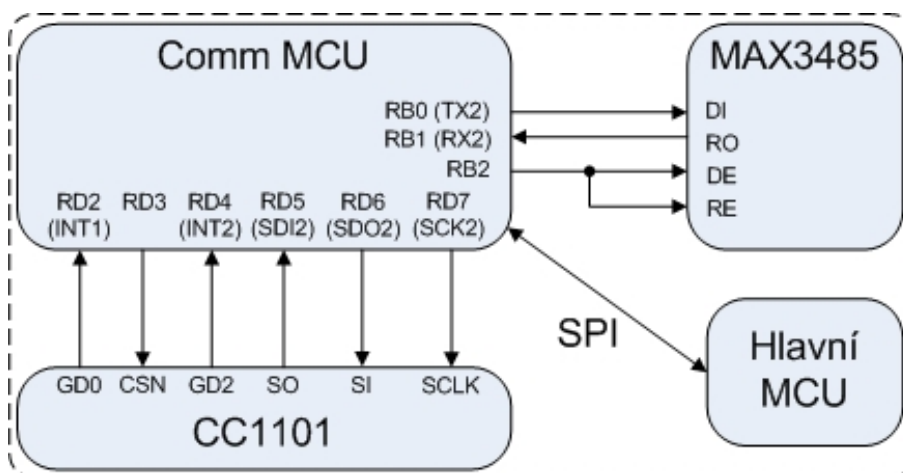
Obrázek 6.5: Konečný automat pro zpracování vstupů Input MCU

## Komunikační mikrokontrolér

Comm MCU obstarává komunikaci s externími displeji a bezdrátovými moduly startovní pistole a terčů/optických závor. K mikrokontroléru je připojen RS485 transceiver MAX3485 na přemapovatelné piny modulu EUSART2. Připojení transceiveru je zřejmé z obrázku 6.6. RS485 je použito ke drátové komunikaci s externími displeji. Data jsou mezi hlavní řídicí jednotkou a řídicí jednotkou displeje přenášena diferencíálním signálem pomocí kroucené dvoulinky. Díky použití čipů MAX3485 lze komunikovat až na vzdálenost 1500 m, což je pro potřeby tohoto systému časomíry více než dostačující. Kroucená dvoulinka je navíc poměrně levné přenosové médium.

Kód příkazu	Význam
0x00	Start měření
0x01	Sražen terč/protnuta optická závora 1
0x02	Sražen terč/protnuta optická závora 2
0x03	Sražen terč/protnuta optická závora 3, případně „+“ svítivost
0x04	Sražen terč/protnuta optická závora 4, případně „-“ svítivost
0x05	Reset časomíry
0x06	Stop měření
0x07	Volná pozice (bez funkce)

Tabulka 6.3: Příkazy pro SPI komunikaci mezi hlavním MCU a Input MCU



Obrázek 6.6: Blokové schéma zapojení Comm MCU

Na přemapovatelný modul SPI2 je připojen RF modul s čipem CC1101. Pomocí SPI se do čipu nahrává konfigurace a data pro vysílání. Zpátky se vrací informace o síle signálu a přijatá data. Čip oznamuje příjem dat pomocí jednoho z pinů GDO0 nebo GDO2, které jsou připojeny na piny MCU vyvolávající externí přerušení INT1 nebo INT2.

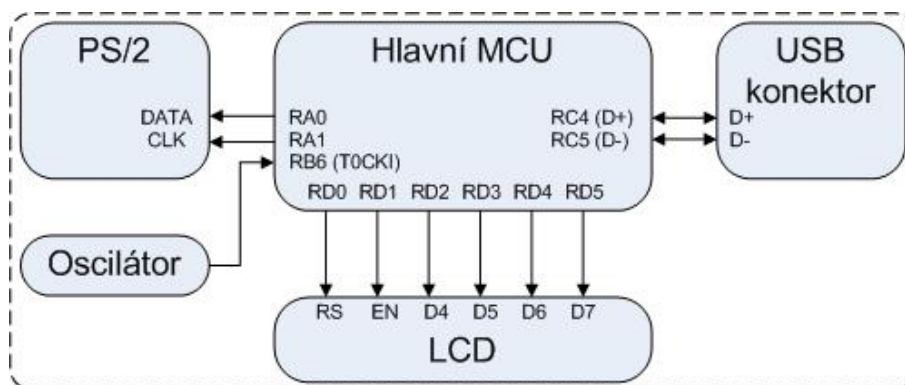
Komunikace mezi hlavní řídicí jednotkou a externími displeji je popsána v kapitole 8. V kapitole 9 je pak nastíněna komunikace s bezdrátovými moduly terčů/optických závor a pistole. Comm MCU v případě drátové komunikace pouze čeká na sběrnici SPI příkazy a data k odeslání od hlavního mikrokontroléru. Pokud se však komunikuje bezdrátově, MCU řídí synchronizaci bezdrátových modulů, přijímá časové značky a v tomto případě naopak informuje o událostech a naměřených časech hlavní mikrokontrolér. O synchronizaci bezdrátových modulů více pojednává kapitola 7.

## Hlavní mikrokontrolér

Hlavní MCU je umístěn na zvláštní DPS, kde jsou navíc jen součástky potřebné pro běh mikrokontroléru. Toto řešení je zvoleno proto, aby v případě potřeby bylo možné vyměnit hlavní MCU za jiný model. Ostatní součástky jsou připojeny na patici, kde se vkládá DPS hlavního mikrokontroléru.

Ten plní funkci masteru na SPI sběrnici a řídí komunikaci mezi subsystémy časomíry. Při použití kabeláže, kdy se nepoužívá bezdrátová komunikace, je čas měřen přímo zde. Je využit čítač 0 v 16bitovém režimu, který je taktován 1 MHz oscilátorem s přesností 10 ppm. Při každém přetečení čítače je vyvoláno přerušení, v jehož obsluze je inkrementováno počítadlo přetečení. Po ukončení měření je z hodnoty počítadla a obsahu čítače vypočítán výsledný čas. Pokud se používá bezdrátové řešení připojení senzorů, dostane mikrokontrolér rovnou výsledný čas od Comm MCU.

Čip dále ovládá informační alfanumerické LCD, které je připojeno na piny RD0 až RD5 (viz obrázek 6.7). Displej informuje uživatele o režimu měření, stavu časomíry a změřených časech. Komunikace s PC probíhá přes USB rozhraní. Hlavní řídicí jednotka časomíry se přihlásí počítači jako HID (Human Interface Device) zařízení. Desktopová aplikace sbírá naměřené časy a umožňuje ovládat časomíru a její nastavení.



Obrázek 6.7: Blokové schéma zapojení hlavního MCU

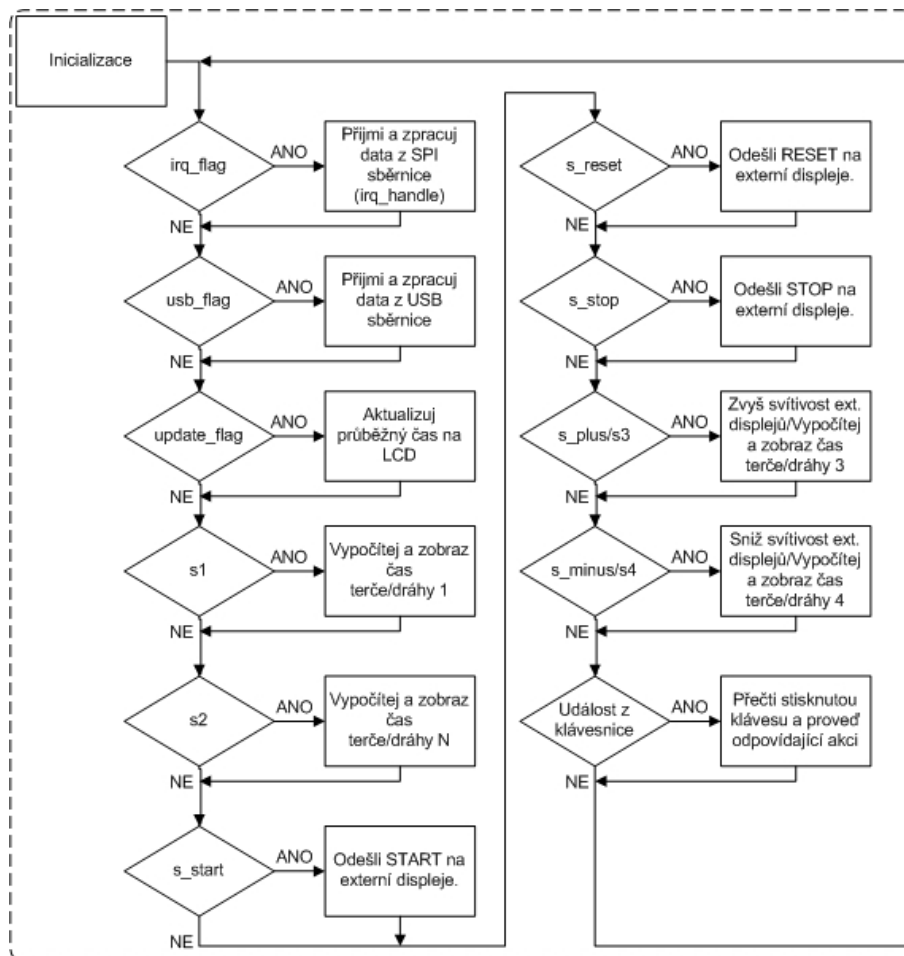
Alternativně lze časomíru ovládat pomocí USB klávesnice, která je zpětně kompatibilní s PS/2. Typ klávesnice je takto omezen, protože je použita knihovna pro PS/2 klávesnici z prostředí MikroPascal PRO a USB modul mikrokontroléru je již použit pro komunikaci s PC. Bohužel tak nelze použít původně zamýšlenou numerickou klávesnici, která kompatibilní není.

## 6.4 Algoritmus řízení časomíry

Centrem řízení systému je hlavní mikrokontrolér. Po inicializaci je na LCD na 3 s zobrazena informace o výrobci a názvu zařízení. Poté se čeká na vyhledání bezdrátových zařízení, které je popsáno v podkapitole 7.1. Typ a počet nalezených zařízení se vypíše na displej a následně časomíra oznámí, že je připravena měřit čas v režimu požární útok.

V tento moment začne běžet hlavní nekonečná smyčka programu, kde se kontrolují příznaky nastálých událostí a podle toho se provádějí příslušné operace. Vývojový diagram hlavní smyčky programu je na obrázku 6.8. Zdrojový kód programu hlavního MCU je v souboru *Main CPU.mpas*, který je k dispozici na CD přiloženém k této práci. Program je napsán v jazyce mikroPascal. Klasické embedded C není použito kvůli vývojovému prostředí, které tento jazyk nepodporuje.

Příznak `irq_flag` je nastaven v obsluze externího přerušení INT0, které je vyvoláno pokud některý ze slave MCU nastavil svou žádost o komunikaci po SPI. Následně je z hlavní smyčky příznak detekován a je zavolána procedura `irq_handle`, která přidělí danému



Obrázek 6.8: Vývojový diagram hlavní smyčky algoritmu řízení systému časomíry

slave MCU sběrnici a vyčte z něj data. Pokud inicioval komunikaci Input MCU, je přijat kód vyskytnuté události a podle toho jsou provedeny příslušné operace a nastaven příznak pro odeslání události do Comm MCU. Komunikační mikrokontrolér zasílá pouze příkazy a změřené časy od bezdrátových zařízení (pokud se komunikuje bezdrátově).

Po přijetí informace o výstřelu ze startovní pistole se vynuluje a spustí čítač 0, který při každém přetečení inkrementuje ve své obsluze přerušeni proměnnou `cycles` a nastaví příznak `update_flag`, po jehož detekci v hlavní smyčce se provede výpočet a zobrazení průběžného času na LCD. Nastavením příznaku `s_start` se poté provede přeposlání informace o startu do Comm MCU, odkud je informace dále rozeslána do všech externích displejů.

Pokud došlo ke sražení terče, či protnutí paprsku optické závory, zkopíruje se aktuální hodnota proměnné `cycles` a čítače 0 a nastaví se příznak `sX`, kde X je číslo terče/závory. Dále se zkontroluje, zda již nepřišel signál od všech koncových zařízení a případně je ukončeno měření. V hlavní smyčce je poté po detekci příznaku `sX` vypočítán výsledný čas terče/závory, který je zobrazen na LCD a odeslán do Comm MCU pro rozeslání na externí displeje.

Stisknutí tlačítka *RESET* způsobí vypnutí a vynulování čítače 0, vynulování časů na informačním LCD a nastavení příznaku `s_reset`, čímž je poté v hlavní smyčce odeslána informace o resetu měření na externí displeje. Tlačítko *STOP* rovněž vypne čítač 0, ale již dosažené časy ponechá na displejích. V případě požárního útoku pak na místo časů nesražených terčů vypíše na LCD i externí displeje pomlčky a na LCD doplní informaci o neplatném pokusu. Při běhu na 100 m s překážkami je na LCD k drahám s neprotlou optickou závorou doplněna informace o neplatném pokusu a na externích displejích jsou na příslušném řádku dráhy vypsány pomlčky.

Pokud nastala změna hodnoty svítivosti externích displejů, jsou nastaveny příznaky `s_plus` a `s_minus` a tato informace je přeposlána přes komunikační mikrokontrolér na displeje.

V hlavní smyčce je dále kontrolováno, zda nebyla zaslána nějaká data z desktopové aplikace pomocí USB rozhraní a případně je provedeno nové nastavení typu měření času, reset či stop měření nebo úprava svítivosti externích displejů. Pokud je detekováno připojení USB k časoměři, jsou navíc do PC přeposílány změřené časy.

Kontroluje se také stisk klávesy na připojené klávesnici a podle rozpoznaného kódu je provedena odpovídající akce. V podstatě se jedná o náhradu ovládání z desktopové aplikace, takže lze pomocí klávesnice resetovat a ukončit měření, změnit nastavení typu měření, upravit svítivost externích displejů apod.

## Kapitola 7

# Implementace bezdrátové komunikace

Cílem kapitoly je popsat použité bezdrátové řešení pro komunikaci mezi moduly systému časomíry. Je rozebrán způsob vyhledání bezdrátových zařízení, vytvoření spojení mezi nimi a identifikace jejich typu, dále je popsán způsob synchronizace bezdrátových zařízení a publikovány výsledky testování parametrů implementovaného řešení.

### 7.1 Vyhledání a rozpoznání bezdrátových zařízení

Po zapnutí hlavní řídicí jednotky časomíry má komunikační mikrokontrolér za úkol vyhledat dostupná bezdrátová zařízení a navázat s nimi spojení. Pomocí funkce `SMPL.Link()` z API knihovny `SimpliciTI` vysílá `Comm MCU` výzvy k navázání spojení po dobu 30 s. Uzly v síti čekají na výzvu ke spojení voláním funkce `SMPL.LinkListen()`. Pokud byla nalezena nějaká zařízení, začne komunikační mikrokontrolér s procesem rozpoznávání typů připojených zařízení, kdy je postupně každému uzlu odeslána žádost o jeho typ (`0xEF`). Zařízení odpovídají svou identifikací: externí displeje zasílají `0xE0`, moduly terčů/závor `0xE1` a modul startovní pistole `0xE2`.

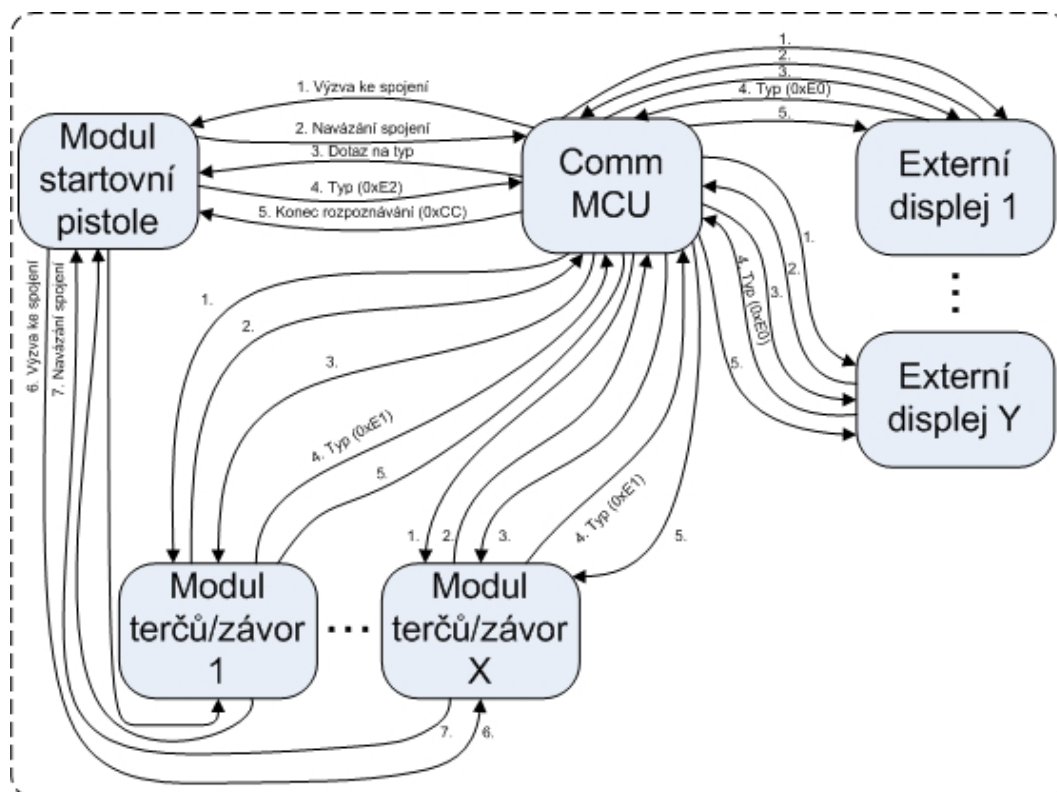
Po dokončení rozpoznávacího procesu je všem zařízením zaslána zpráva `0xCC`, kterou `Comm MCU` dává najevo, že dokončil inicializaci bezdrátové komunikace. Pokud jsou v síti moduly pistole a terčů/závor, je dále provedeno navázání komunikace mezi těmito moduly. Výzvy ke spojení v tomto případě vysílá modul pistole a moduly terčů/závor na ně odpovídají. Externí displeje se této komunikace již neúčastní. Celý proces inicializace bezdrátové komunikace je znázorněn na obrázku 7.1.

### 7.2 Synchronizace bezdrátových zařízení

Navrhovaný systém časomíry počítá s bezdrátovým řešením připojení startovní pistole a spínačů v terčích, či optických závor cílové čáry. Je tedy nutné řešit časovou synchronizaci jednotlivých zařízení, protože informace o nastálé události dorazí do hlavní řídicí jednotky časomíry se zpožděním, které navíc není konstantní. Vzhledem k tomu, že je čas měřen s přesností na jednu tisícinu sekundy, je potřeba navrhnout způsob synchronizace s dostatečně jemným rozlišením času.

Základní metodou časové synchronizace je využití serveru, který periodicky zasílá hodnotu svých logických hodin do klientských stanic. Toto řešení lze použít, pokud je latence





Obrázek 7.1: Proces vyhledání a rozpoznání bezdrátových zařízení v síti

bezdrátového přenosu řádově menší, než požadovaná přesnost synchronizace. Přesnost lze dále vylepšit tím, že klient odešle žádost, na kterou dostane od serveru odpověď s hodnotou hodin. Klient si navíc změří čas, za který mu dorazila odpověď a odhadne z něj latenci komunikace. K obdržení času serveru se pak přičte latence a získá se tak přesněji synchronizovaná hodnota hodin klienta. Existují však i přesnější řešení, mezi které patří např. Reference Broadcast Synchronization (RBS) [18].

## Zdroje chyb v časové synchronizaci

Největším problémem synchronizace je nedeterminismus. Do odhadu latence komunikace se promítají náhodné události, které způsobují, že čas od vyslání požadavku do přijetí odpovědi se v průběhu komunikace mění, což má přímý dopad na synchronizační chybu. Pro lepší pochopení, kde chyba vzniká, je vhodné se blíže podívat na zdroje latence komunikace. V příspěvku o RBS jsou uváděny 4 samostatné zdroje [18]:

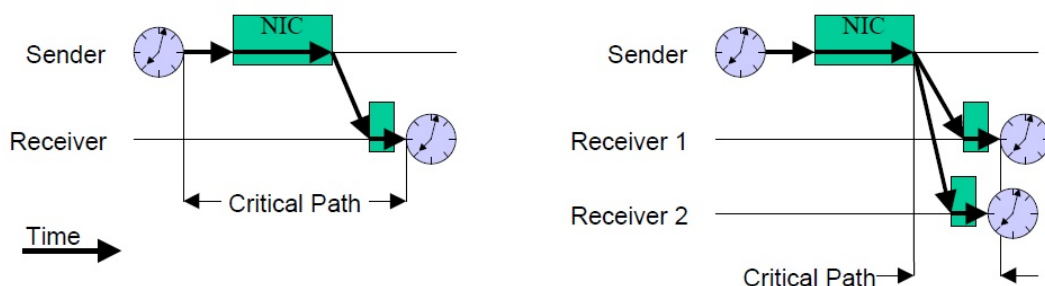
- **Doba odeslání** – čas, který potřebuje vysílač pro konstrukci zprávy. Tato doba může být ovlivněna příchozími přerušováními na MCU vysílače. Patří zde i doba přesunu dat z MCU do RF modulu.
- **Čekání na přenos** – zpoždění způsobené čekáním na volný přenosový kanál, případně způsobené dalšími synchronizačními mechanismy fyzické vrstvy komunikačního protokolu.

- **Doba přenosu** – čas potřebný pro přenesení zprávy mezi vysílačem a přijímačem od doby, kdy zpráva opustí vysílač. Pokud jsou obě strany blízko sebe, je tato doba velmi malá, až zanedbatelná. Větší význam má ve rozlehlejších sítích, které obsahují směrovače a přepínače.
- **Doba příjmu** – zde patří zpracování přijaté zprávy a vygenerování signálu oznamující příjem mikrokontroléru přijímače. Pokud je v MCU zaznamenán čas detekce příjmu v dostatečném rozlišení, není do doby příjmu započítán čas přenosu zprávy z RF modulu do MCU.

## Reference Broadcast Synchronization

Tento způsob synchronizace pracuje s broadcastovými zprávami na fyzické vrstvě, které tak musí podporovat použitá technologie bezdrátové komunikace. Čip CC1101 tuto funkčnost nabízí, RBS tedy v tomto případě použít lze.

Použití broadcastového kanálu umožňuje z kritické cesty komunikace odstranit dobu odeslání a čekání na přenos. Broadcastová zpráva fyzické vrstvy z jediného zdroje totiž dorazí k synchronizovaným zařízením s téměř stejným zpožděním. Zpráva je použita pouze k synchronizaci jednotlivých přijímačů mezi sebou. Tím se RBS liší od ostatních protokolů, které synchronizují vysílač s přijímačem. Porovnání kritické cesty klasické synchronizace s RBS je na obrázku 7.2.



Obrázek 7.2: Porovnání kritické cesty komunikace při použití klasického synchronizačního protokolu (vlevo) a RBS (vpravo) (převzato z [18])

RBS broadcast je používán jako relativní časová reference, nikdy se nezasílají absolutní časy hodin. Právě díky této vlastnosti je možné eliminovat dobu odeslání a čekání na přenos, které mohou být různě dlouhé a v čase se měnit. Přijímače jsou totiž synchronizovány referenčním paketem, jehož doba vyslání z jediného vysílače je pro všechny přijímače stejná. Paket neobsahuje žádnou časovou značku a ani nezáleží na tom, kdy přesně byl odeslán. Záleží pouze na čase, kdy byl doručen přijímači.

Doba přenosu referenčního paketu je tímto algoritmem zanedbána, protože cílová přesnost synchronizace má být v řádu mikrosekund a doba přenosu se v závislosti na vzdálenosti zařízení od sebe pohybuje v nanosekundách. Doba příjmu musí být deterministická, to znamená, že např. signál oznamující příjem paketu musí být vygenerován okamžitě a ne až po zaplnění RX bufferu RF modulu. V MCU pak musí signál vyvolat externí přerušení, v jehož obsluze je zaznamenána hodnota lokálních hodin.

V nejjednodušší podobě algoritmu pošle vysílač jednu broadcastovou zprávu, kterou očekávají 2 přijímače. Oba dva si zaznamenají čas svých lokálních hodin v okamžiku přijetí zprávy. Následně si tyto časy přijímače vzájemně vymění, čímž získají ofset svých hodin od hodin druhého zařízení. V tento okamžik jsou obě zařízení synchronizovány, pokud budou posílat časovou značku nastalé události, použijí ofset k přepočítání svého času na čas cílového zařízení a tento čas odešlou. K dosažení co nejlepší přesnosti synchronizace je však potřeba odeslat více referenčních zpráv, algoritmus 1 ukazuje obecný postup pro  $n$  zpráv a  $m$  přijímačů.

---

**Algoritmus 1:** Obecný algoritmus Reference Broadcast Synchronization

---

- 1 Vysílač odešle  $n$  broadcastových zpráv;
  - 2 Každý z  $m$  přijímačů si zaznamená hodnotu svých hodin pro každou z  $n$  zpráv;
  - 3 Přijímače si vzájemně vymění zaznamenané hodnoty;
  - 4 Každý přijímač  $i$  vypočítá ofset svých hodin s hodinami všech přijímačů  $j$ :
    - (a)  $\forall i \in m, j \in m : Offset[i, j] = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (T_{j,k} - T_{i,k})$   
kde  $T_{r,b}$  znamená hodnotu hodin přijímače  $r$  při příjmu broadcastu  $b$
    - (b) Použije se výpočet lineární regrese pomocí metody nejmenších čtverců
- 

Autory RBS bylo empiricky zjištěno, že při  $n = 30$  lze dosáhnout přesnosti synchronizace až na  $1,6\mu s$ . Průměrování offsetu přes hodnoty změřené při všech referenčních zprávách funguje za předpokladu, že oscilátory hodin všech zařízení v síti tikají se stejným intervalem, který se nemění vlivem okolního prostředí. Při reálné implementaci toto však neplatí, proto je nutné nad změřenými daty každé dvojice přijímačů vypočítat křivku lineární regrese pomocí metody nejmenších čtverců. V křivce je poté zohledněn ofset i zpoždění synchronizovaných hodin. Z rovnice vypočtené křivky lineární regrese a času vysílače se pak získá čas zařízení, se kterým se komunikuje.

## Vlastní implementace časové synchronizace

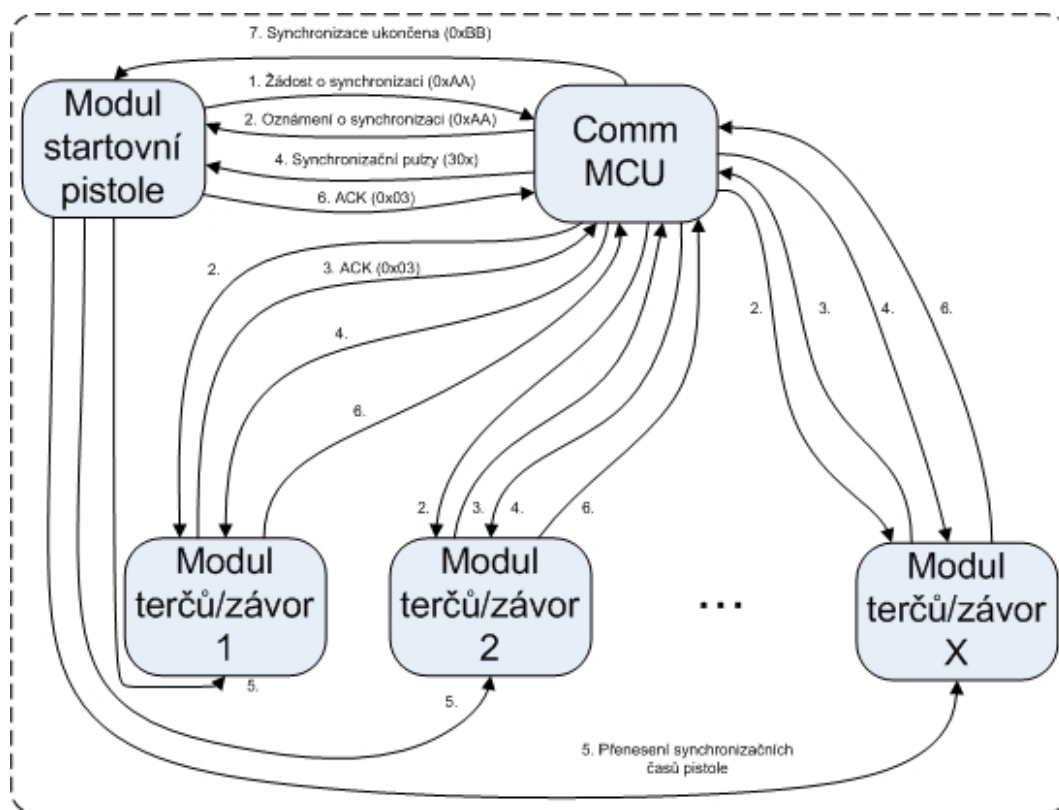
Pro potřeby této práce je nutné implementovat synchronizaci s přesností minimálně na 1 ms, ideálně pak alespoň na  $100\mu s$ . RBS v tomto směru naprosto vyhovuje a jeho algoritmus je srozumitelně popsán tak, aby jej šlo pohodlně implementovat. Přesto v něm byly provedeny malé úpravy, aby jeho aplikace lépe vyhovovala této práci.

V roli vysílače referenčních broadcastových zpráv je Comm MCU v hlavní řídicí jednotce časoměry. Přijímače jsou modul startovní pistole a 1 až  $X$  modulů pro komunikaci s terčí/optickými závory. Ještě před synchronizací se musí provést inicializace bezdrátové komunikace, která je popsána výše v podkapitole 7.1.

Synchronizace je vyžádána tlačítkem na modulu pistole a provádí se před startem každého pokusu. Je to nutné kvůli tomu, že hodiny zařízení vydrží být synchronizovány jen několik minut. Poté je nutné provést synchronizaci znovu a protože interval mezi pokusy není stejný, musí se žádost provést ručně. Po stisku synchronizačního tlačítka je do hlavní řídicí jednotky zaslána žádost 0xAA, která je poté odeslána do modulu pistole zpět a navíc preposlána do ostatních zařízení. Tím je oznámen začátek synchronizace. Všechny moduly reagují vynulováním svých lokálních hodin, které neustále běží. Dále moduly odešlou zpět do hlavní řídicí jednotky ACK zprávu a poté čekají na synchronizační broadcasty.

Těch je z Comm MCU zasláno celkem 30 v intervalu 10 ms. Moduly si zaznamenají časy svých hodin při příchodu zpráv a následně modul startovní pistole odešle své změřené

časy do všech modulů terčů/závor. Ostatní moduly si časy navzájem nevyměňují, protože je potřeba synchronizovat pouze pistoli s terči/závorami. Každý modul pak pomocí doručených dat vypočítá offset svých hodin s hodinami pistole. Po dokončení výpočtů zašlou všechny moduly do hlavní řídicí jednotky ACKNOWLEDGE paket, čímž oznamují, že jsou připraveny. Po obdržení potvrzení od všech bezdrátových modulů systému je synchronizace dokončena. Comm MCU o tom informuje modul startovní pistole zprávou 0xBB. Startér je pak upozorněn rozsvícením indikační diody, že může odstartovat pokus. Proces synchronizace je znázorněn na obrázku 7.3.



Obrázek 7.3: Proces synchronizace bezdrátových modulů systému elektronické časomíry

Po výstřelu je hodnota lokálních hodin modulu pistole odeslána do Comm MCU, který poté provede odpovídající akce (spuštění průběžného času na displeji apod.). Sražením terče, či protnutím cílové optické závory se provede uložení hodnoty lokálních hodin příslušného modulu, tato hodnota je poté pomocí offsetu přepočítána na hodnotu hodin modulu pistole a odeslána do hlavní řídicí jednotky. V komunikačním mikrokontroléru jsou z doručených časových značek vypočítány dosažené časy terčů či drah. Tyto časy jsou poté odeslány na externí displeje a přes SPI sběrnici jsou časy dále odeslány do hlavního MCU, odkud míří na informační LCD hlavní řídicí jednotky a do desktopové aplikace na PC. Pokud systém obsahuje i displeje terčů nebo drah, jsou časy zaslány i do bezdrátových modulů terčů/závor, které tyto displeje obsluhují.

### 7.3 Testování dosahu a spolehlivosti bezdrátové komunikace

Ke hledání optimálního nastavení RF modulů pro dosažení použitelného dosahu a spolehlivosti komunikace byla použita sada Performance Line Development Kit od firmy Texas Instruments. K tomuto systému lze připojit používané moduly s čipem CC1101 a otestovat jejich schopnosti. Nastavení modulů usnadňuje aplikace SmartRF Studio, pomocí které lze vyexportovat hodnoty konfiguračních registrů CC1101 pro dané nastavení a použít ho v knihovně SimpliciTI nebo jej prostřednictvím testovací sady rovnou nahrát do RF modulů a vyzkoušet.

Sada obsahuje dva moduly na samostatných DPS, ke kterým lze připojit bezdrátový modul. Na obou deskách je grafický LCD a ovládací tlačítka, pomocí kterých lze spustit základní sadu testů nad komunikací RF modulů. Případně lze desky připojit k PC a testy ovládat pomocí SmartRF Studia, odkud lze spustit rozšířené testování.

Protože není potřeba přenášet velké množství dat a důležitější je spolehlivost přenosu, byla zvolena přenosová rychlost 2,4 kBaud. Kanály v přenosovém pásmu byly odděleny 200 kHz. Vyzkoušeny byly modulace 2-FSK, 4-FSK, GFSK, MSK a ASK v pásmu 868 MHz. Dosah a spolehlivost komunikace mezi dvěma RF moduly byly testovány v husté zástavbě centra Brna. Jeden z modulů neustále zasílal pakety, které přijímal druhý modul. Sledoval se počet chybně přenesených, či nedoručených paketů a zároveň úroveň signálu v závislosti na vzdálenosti mezi moduly.

Již od začátku měření však měla komunikace, bez ohledu na modulaci, velmi špatné parametry: při vzdálenosti mezi moduly přibližně 1 m byla úroveň signálu -88 dBm a se vzdáleností rychle klesala. Docházelo k velkým ztrátám paketů a od 20 m byla komunikace prakticky nepoužitelná.

Toto vůbec neodpovídalo parametrům udávaným výrobcem modulu. Přesto, že moduly měly pracovat v pásmu 868 MHz, což bylo potvrzeno i v e-mailové komunikaci s výrobcem, bylo zřejmé, že moduly nejsou pro toto pásmo impedančně přizpůsobené. Protože byly moduly zakoupeny v Číně, trvala by reklamace, či zaslání jiných modulů příliš dlouhou dobu, čímž by byla ohrožena implementační část této práce. Proto byly změřeny parametry komunikace při použití pásma 433 MHz s cílem zjistit, zda je toto pásmo se zakoupenými moduly použitelné.

Při měření bylo zjištěno, že jsou moduly doopravdy impedančně přizpůsobené pásmu 433 MHz. Parametry komunikace byly v tomto případě mnohem lepší: ve vzdálenosti modulů od sebe okolo 1 m byla úroveň signálu -30 dBm a ztráty paketů žádné. Nejlepší parametry vykazovala modulace GFSK, se kterou byly moduly schopny komunikovat i na 300 m vzdušnou čarou přes centrum Brna se ztrátou paketů do 1 % při úrovni signálu -100 dBm.

Tyto parametry jsou pro potřeby vyvíjeného systému více než dostatečné a použití pásma 433 MHz nijak neovlivňuje navržený koncept. Čip CC1101 má hardwarovou podporu pro CCA a použitý protokol SimpliciTI implementuje FHSS, čímž jsou eliminovány problémy se zarušením pásma. Rozhodl jsem se tedy oproti původnímu plánu použít pásmo 433 MHz.

## Kapitola 8

# Implementace externích displejů

Externí displeje slouží k zobrazování změřených časů soutěžních pokusů. Jsou především určeny pro informování diváků a samotných soutěžících. Návrh systému umožňuje konstruovat displeje teoreticky až o 31 řádcích, kdy na každém řádku může být až šest sedmi-segmentových číslic. Prakticky je však potřeba maximálně čtyřřádkový displej pro účely měření čtyř drah disciplíny běh na 100 m s překážkami.

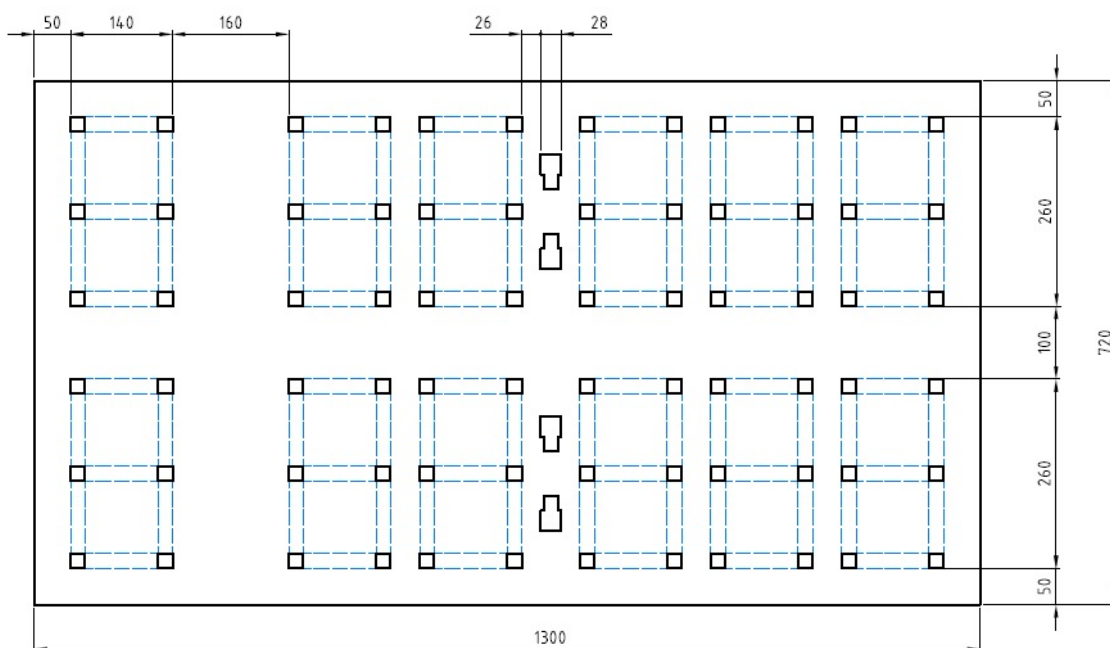
Nejlevnější variantou je jednořádkový displej, který lze použít pro měření obou disciplín. Při požárním útoku se na displeji zobrazí výsledný čas pokusu, časy dalších terčů se poté postupně na displeji vymění. U běhu na 100 m s překážkami se na displeji zobrazí čas nejrychlejší dráhy a po doběhnutí všech závodníků se časy jednotlivých drah na displeji vystřídají. V obou variantách se před dokončením pokusu zobrazuje průběžný čas, který je aktualizován každých 100 ms. Tento typ displeje je použitelný i pro umístění přímo k terči, či cílové závoře atletické dráhy. V tomto případě se na terči zobrazuje pouze čas konkrétního terče nebo dráhy, u které je displej umístěn.

Dvouřádkový displej představuje kompromis mezi cenou a komfortem zobrazování. Pro klasický požární útok se dvěma terči lze zobrazovat časy obou terčů na jednotlivých řádcích. V případě více terčů se musí časy na displeji střídat po ukončení pokusu. U běhu na 100 m s překážkami se na displeji zobrazují časy dvou nejlepších drah, další časy se poté opět střídají. Tento displej byl vyroben s 260 mm číslicemi pro SDH Brušperk. Rozložení číslic displeje je na obrázku 8.1.

Displej se třemi řádky je určen primárně pro měření požárního útoku. Na prvním řádku běží průběžný čas a je na něm po ukončení pokusu výsledný čas pokusu. Další 2 řádky slouží pro zobrazení časů jednotlivých terčů. Při použití více terčů se opět musí časy na spodních řádcích střídat, výsledný čas na horním řádku však zůstává. Pro druhou disciplínu je možné přiřadit tři dráhy k jednotlivým řádkům. Čas případné čtvrté dráhy se musí střídat s časem na posledním řádku. Tímto displejem disponuje můj domovský sbor z Vyšních Lhot. Na první řádek byly použity číslice o výšce 260 mm, zbylé řádky tvoří 130 mm číslice. Viz obrázek 8.2.

Čtyři řádky naleznou využití především při běhu na 100 m s překážkami, kdy se každé dráze přiřadí jeden řádek. Nemusí se tak žádný čas přepínat. Při požárním útoku lze zobrazovat časy čtyř terčů, což stačí naprosté většině soutěží. Kdyby bylo přeci jen potřeba měřit čas více terčů, musely by se časy na řádcích střídat.

Segmenty číslic jsou tvořeny LED pásky s vysoce svítivými červenými diodami SMD5050. Nejmenší délka pásky je 50 mm při šířce 10 mm, z toho je odvozena i nejmenší možná výška číslice 130 mm. Výška teoreticky shora omezena není, avšak zkušenosti s displejem vyrobeným v rámci mé bakalářské práce [2] ukázaly, že číslice větší než 260 mm vedou na příliš



Obrázek 8.1: Výkres čelní strany dvouřádkového provedení displeje

rozměrný displej, se kterým se špatně manipuluje. Pro lepší čitelnost displeje je dále nutné u 260 mm číslic použít na segmenty dva pásy vedle sebe, čímž se šířka segmentu změní na 20 mm.

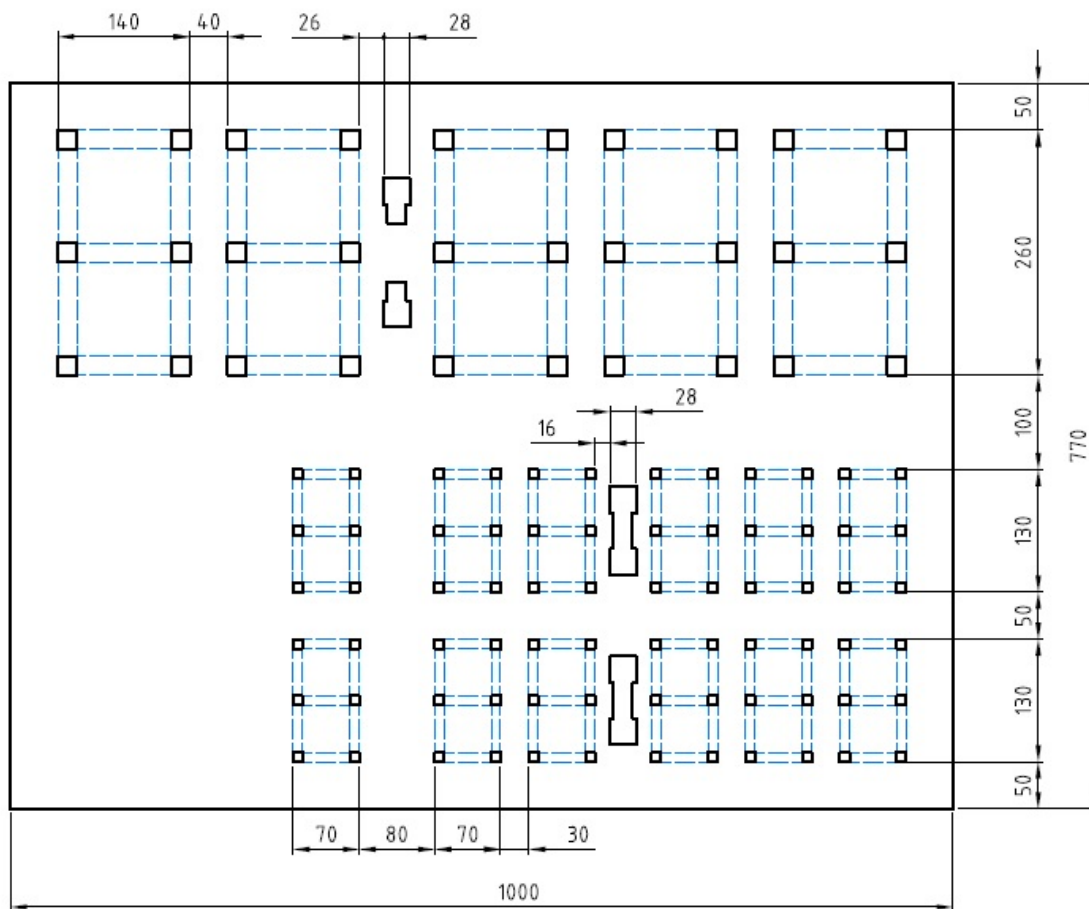
Pokud je na řádku využito pro zobrazení času všech šest číslic, má displej rozsah 0 až 999,999 s. Pravidla omezují délku pokusu ve všech disciplínách na 120 s, v praxi však téměř nikdy nepřekročí měřený čas hodnotu 99,999 s. První číslici tak lze použít pro rozlišení terče/dráhy ke které čas na příslušném řádku patří. Při požárním útoku se pro levý terč ze segmentů číslice vytvoří znak „L“ a pro pravý terč „P“. U běhu na 100 m s překážkami se zobrazuje číslo dráhy, ke které řádek patří, tedy číslice 1 až 4.

## 8.1 Obvodová realizace

O komunikaci s hlavní řídicí jednotkou časoměry se stará řídicí jednotka displeje, která je na samostatné DPS. Komunikace může probíhat přes sběrnici RS485 nebo bezdrátově pomocí RF modulu s čipem CC1101. Z hlavní řídicí jednotky přicházejí změřené časy, informace o startu, restartu a ukončení měření a příkazy ke změně úrovně svítivosti displeje. Tyto informace jsou v řídicí jednotce displeje zpracovány a poté přeposlány pomocí druhé sběrnice RS485 na řídicí DPS jednotlivých řádků. Sběrníkové řešení umožňuje jednoduše měnit potřebný počet řádků, který je omezen jen kapacitou sběrnice (max. 31 slave zařízení + jeden master). V každém typu displeje je tak stejná elektronika, pouze se mění počet řídicích DPS řádků, které se připojí ke sběrnici.

DPS řídicí jednotky displeje obsahuje mikrokontrolér PIC18F47J53, dva RS485 transceivery MAX3485, RF modul s čipem CC1101, 3,3 V stabilizátor napětí LD1117DT33 a pasivní součástky potřebné pro běh MCU a stabilizátoru. K pinům USB modulu mikrokontroléru



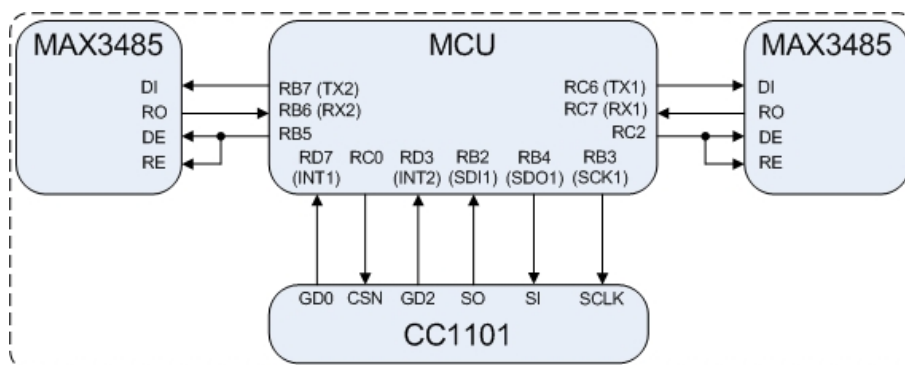


Obrázek 8.2: Výkres čelní strany třířádkového provedení displeje

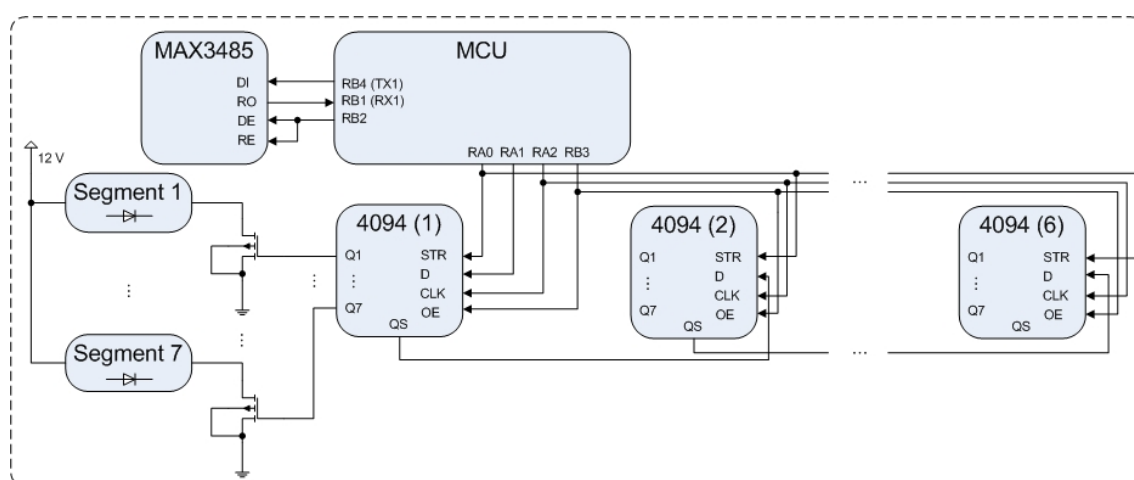
je připojen USB konektor, který slouží k nahrání nového firmware jednotky. První RS485 transceiver je připojen k EUSART1 modulu MCU a slouží ke komunikaci s hlavní řídicí jednotkou, kdy displej plní funkci slave. Druhý transceiver je připojen na přemapovatelné piny modulu EUSART2. Probíhá přes něj komunikace na sběrnici s připojenými řídicími deskami řádků, kdy řídicí jednotka displeje je master zařízení na této sběrnici. Blokové schéma zapojení je na obrázku 8.3.

Na DPS řídicí zobrazování na řádku displeje je osazen mikrokontrolér PIC18F1320, ke kterému je na piny modulu EUSART1 připojen RS485 transceiver MAX487. Každé ze šesti ovládaných číslic má svůj vlastní posuvný registr 4094, na jehož výstupy jsou připojeny N-MOSFET tranzistory IRLR024NPBF, které připojují 12 V napětí na jednotlivé segmenty dané číslice. Datový výstup QS registru je zapojen na datový vstup D registru následující číslice. Takto jsou propojeny všechny posuvné registry. Datový vstup registru první číslice je pak připojen k MCU, kde jsou připojeny i zbylé vstupy STR, CLK a OE, které jsou propojeny mezi všemi registry. Pin RB3, který ovládá povolovací signál OE, může pomocí PWM regulovat svítivost displeje. Schéma zapojení je na obrázku 8.4. Elektronika je na DPS napájena 5 V stabilizátorem napětí LM340S-5.0, segmenty číslic jsou napájeny přes tranzistory přímo ze zdroje displeje 12 V napětím.





Obrázek 8.3: Blokové schéma zapojení řídicí jednotky externího displeje



Obrázek 8.4: Blokové schéma zapojení DPS řídicí řádek displeje

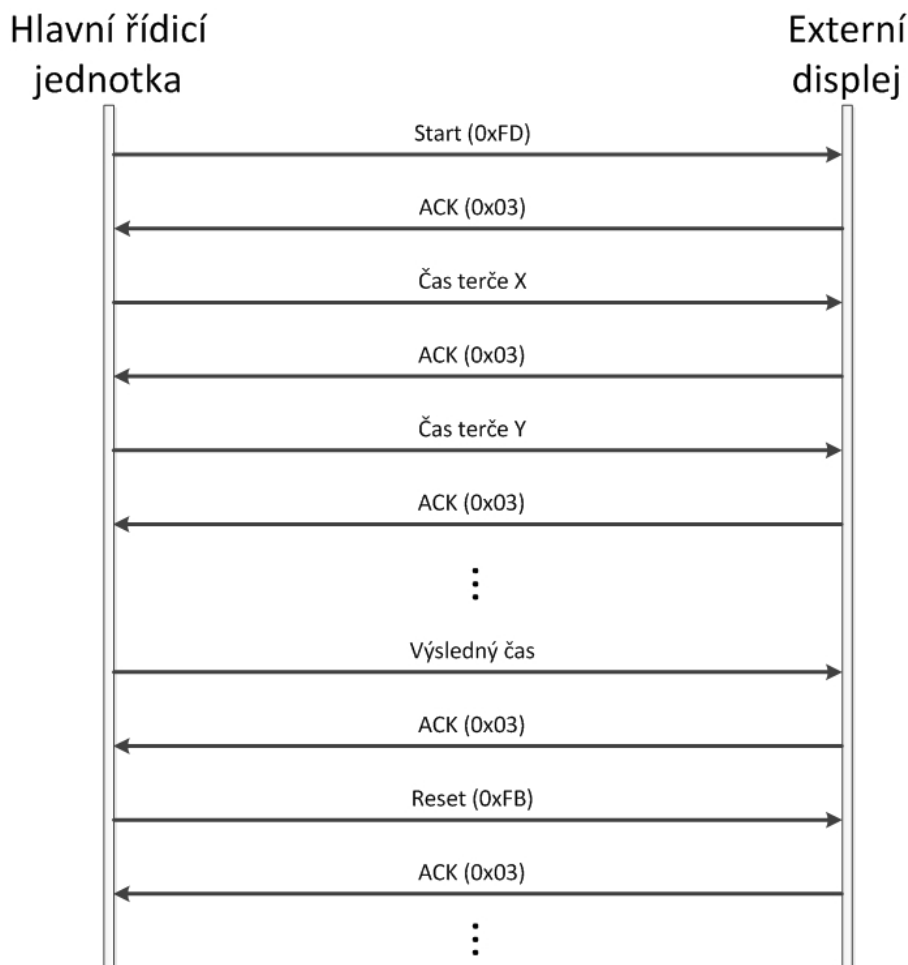
## 8.2 Komunikační protokoly

Protokol komunikace je pro oba způsoby přenosu dat v podstatě stejný. Jisté odlišnosti jsou jen v případě přenosu změřeného času z hlavní řídicí jednotky do externího displeje, kdy je potřeba poslat 5 B dat, což lze bezdrátově realizovat jedním paketem, ale po RS485 je potřeba odeslat dva pakety.

Po inicializaci časomíry nejdříve hlavní řídicí jednotka zjišťuje, zda je na sběrnici RS485 připojen nějaký displej. Pokud do 15 s dorazí od displeje odpověď, použije se drátová komunikace. V opačném případě se externí displeje vyhledávají v rámci inicializace bezdrátové komunikace popsané v podkapitole 7.1. Pokud se podaří nějaké bezdrátové displeje najít a navázat s nimi spojení, odešle se na informační LCD počet připojených externích displejů a může začít komunikace.

Kódy příkazů jsou stejné jako v případě SPI komunikace mezi hlavním a Comm MCU a jsou uvedeny v tabulce 6.2. Typický průběh komunikace během jednoho měření času při požárním útoku je na obrázku 8.5. Po výstřelu startovní pistole je odeslána informace o startu měření na všechny připojené displeje (zpráva 0xFD). V tento moment se spustí v displejích časovač s periodou 100 ms, který se stará o aktualizaci průběžného času. Ten

sice poté běží s určitým zpožděním oproti reálnému průběžnému času, ale čas na displeji je v průběhu pokusu pouze orientační a několik milisekund zpoždění tedy nevadí.



Obrázek 8.5: Protokol komunikace mezi hlavní řídicí jednotkou časoměry a externím displejem

Poté jsou postupně po shození terčů zaslány jejich dosažené časy. Data paketu s hodnotou času jsou uvozena bajtem 0xFF, za kterým je kód řádku, na kterém se má čas zobrazit. První řádek má kód 0x00, druhý 0x01 atd. Datová část paketu je zakončena hodnotou samotného času zakódovanou do čtyř bajtů.

Displeje zobrazují průběžný čas, dokud jim nedorazí paket s výsledným časem (v případě požárního útoku), nebo dokud jim nedorazí časy všech měřených drah při běhu na 100 m s překážkami. V prvním případě displeje zastaví průběžný čas a místo něj zobrazí výsledný čas na prvním řádku. U druhé varianty běží průběžný čas na všech řádcích a je postupně nahrazován časy drah.

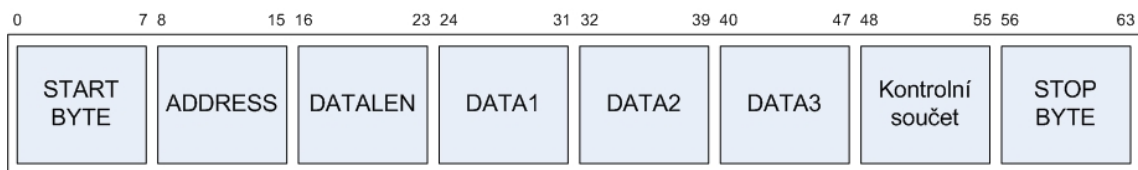
Vynulování externích displejů se provede zasláním paketu s kódem 0xFB, který uvede displeje do původního stavu před začátkem měření. Dále lze regulovat svítivost segmentů číslic displejů kódy 0xFA (přidat svítivost) a 0xF9 (ubrat svítivost). Kód 0xFC informuje displeje o ukončení měření tlačítkem STOP. V tomto případě se zastaví průběžný čas a jeho poslední hodnota se ponechá zobrazená společně s předtím doručenými časy. Před

začátkem nového pokusu se pak musí časomíra vynulovat a komunikace může probíhat zase od začátku.

Spolehlivé doručení informace je zajištěno pomocí systému odpovídání. Po odeslání každého paketu z hlavní řídicí jednotky musí každý z připojených displejů odpovědět do 300 ms ACK paketem, kterým potvrzují přijetí dat. Pokud ve stanoveném časovém limitu potvrzení nedorazí, je předchozí paket odeslán znovu.

## Protokol nad RS485

Nad fyzickou vrstvou RS485 byl implementován jednoduchý protokol podle předlohy protokolu pro RS485, který je součástí vývojového prostředí MikroPascal PRO od firmy Mikroelektronika. Původní knihovna nemohla být použita, protože kompilátor tohoto prostředí nepodporuje reentrantní funkce, které naopak potřebuje ke své funkci knihovna `SimpliciTI`.



Obrázek 8.6: Struktura paketu protokolu pro RS485

Struktura paketu je na obrázku 8.6. Začíná se START bajtem, který má pevnou hodnotu 0x96. Následuje adresa zařízení, pro které je bajt určen (v případě, že paket odesílá master). Pokud paket zaslal slave, nastaví tento bajt na svou adresu. Dále je zde bajt DATALEN, jehož hodnota bitů říká, kolik datových bajtů se posílá, zda byla hodnota dat či adresa změněna operací xor s hodnotou 1 a jestli paket posílá master nebo slave zařízení. Přesný význam bitů je v tabulce 8.1. Bajty jsou změněny, pokud je jejich hodnota shodná se START nebo STOP bajtem. Po DATALEN následují datové bajty, které mohou být maximálně tři. Dále je připojen bajt s vypočteným kontrolním součtem paketu a poslední je STOP bajt (hodnota 0xA9). Pseudokód výpočtu kontrolního součtu nad daty paketu je znázorněn v algoritmu 2.

---

### Algoritmus 2: Výpočet kontrolního součtu dat paketu protokolu nad RS485

---

```

1 crc = address xor datalen;
2 crc = crc xor data1 ; // pokud existují
3 crc = crc xor data2 ; // pokud existují
4 crc = crc xor data3 ; // pokud existují
5 crc = !crc;
6 if (crc == START_BYTE || crc == STOP_BYTE) then
7   crc ++;
8 end

```

---

Knihovna s protokolem pro RS485 umožňuje ovládat oba EUSART moduly mikrokontroléru z rodiny PIC18F. Přemapovatelný modul EUSART2 musí být inicializován funkcí `RS485Master_RemappableInit()` nebo `RS485Slave_RemappableInit()`. První modul je inicializován funkcemi bez „Remappable“ v názvu. Inicializační funkci je v parametrech předán port (konstanty `PORT_A` až `PORT_E`) a číslo pinu, který ovládá směr komunikace

Bit	Hodnota	Význam
7	1	Paket odesílá master
	0	Paket odesílá slave
6	1	Adresa byla změněna operací xor s hodnotou 1
	0	Adresa nebyla změněna
5	0	Pevná hodnota bez významu
4	1	Datový bajt 3 byl změněn operací xor s hodnotou 1
	0	Datový bajt 3 nebyl změněn
3	1	Datový bajt 2 byl změněn operací xor s hodnotou 1
	0	Datový bajt 2 nebyl změněn
2	1	Datový bajt 1 byl změněn operací xor s hodnotou 1
	0	Datový bajt 1 nebyl změněn
1 a 0	0 až 3	Počet datových bajtů

Tabulka 8.1: Význam bitů v DATALEN bajtu paketu

transceiveru. V případě slave zařízení je předána i adresa zařízení na sběrnici.

Master posílá data pomocí funkce `RS485Master_Send()`, které je předán ukazatel na buffer s daty, délka dat a adresa slave zařízení, kterému je paket určen. Buffer je velikosti 7B, kdy data se nahrávají do prvních tří bajtů a zbylé bajty slouží jako příznaky nastalých událostí, viz tabulka 8.2. Příjem dat probíhá pomocí funkce `RS485Master_Receive()`, která je volána při vyvolání přerušení od události příjmu EUSART modulu a která nahraje data a příznaky do bufferu předaného funkci ukazatelem.

Bajt	Význam
0	Datový bajt 1
1	Datový bajt 2
2	Datový bajt 3
3	Počet datových bajtů
4	Příznak přijetí paketu
5	Příznak chyby v paketu
6	Adresa slave odesílatele

Tabulka 8.2: Význam bajtů v bufferu pro RS485 komunikaci

Podobně probíhá komunikace na straně slave MCU, kde se používají funkce `RS485Slave_Send()` a `RS485Slave_Receive()`. Provoz na sběrnici má plně ve své režii uživatel, který se tak musí postarat o to, aby nedocházelo ke kolizím, kdy vysílá pakety více zařízení najednou.

## Kapitola 9

# Implementace bezdrátových modulů

Bezdrátové moduly slouží v systému časomíry ke komunikaci se senzory, tedy se startovní pistolí a se spínači v terčích, případně optickými závory v cíli běhu na 100 m s překážkami. Tato kapitola popisuje obvodovou realizaci modulů a způsob jejich použití. Na rozdíl od ostatních komponent systému nebyly tyto moduly zatím vyrobeny z důvodu vyčerpání rozpočtu projektu. Jejich zapojení však bylo implementováno, stejně jako programy pro jejich mikrokontroléry. Funkce modulů byla ověřena na DPS řídicích jednotek externích displejů, které bylo možné pro tento účel s menšími omezeními použít.

Základní funkce obou druhů modulů je stejná. Běží v nich lokální hodiny taktované na 1 MHz. Zařízení se účastní synchronizace a poté při události vyvolané připojenými senzory odesílají časové značky tvořené hodnotou svých lokálních hodin při výskytu těchto událostí. Základem lokálních hodin je čítač 0 v 16bitovém režimu. Při každém přetečení čítače je vyvoláno přerušení, v jehož obsluze je inkrementována proměnná s počítadlem přetečení. Časová značka má velikost 32 bitů a je tvořena počtem tiků čítače od začátku synchronizace vypočítaným z počtu přetečení čítače a hodnoty čítače při výskytu události.

### 9.1 Modul startovní pistole

Používá se jako náhrada kabelového spojení pistole s hlavní řídicí jednotkou časomíry. Pistole se k modulu připojí prostřednictvím stejného konektoru, jako při použití kabeláže. Modul však slouží i k ovládní časomíry, kromě startu měření času lze pomocí něj i resetovat, či ukončit měření. Dále umožňuje provést časovou synchronizaci bezdrátových komponent systému.

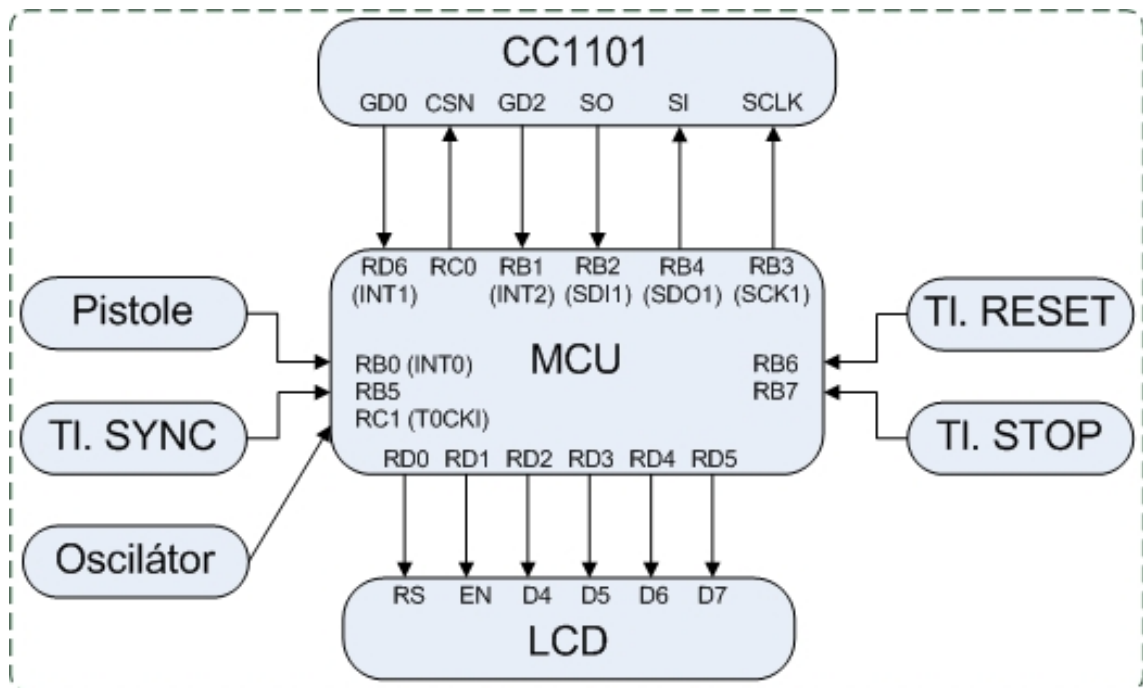
Startér má modul umístěn na opasku. Pro větší komfort nošení, je vhodné mít i pouzdro pro odložení pistole. Obsluha si může ověřit stav časomíry na jednořádkovém alfanumerickém LCD, kde se zobrazují potřebné informace. Typický průběh odstartování pokusu při požárním útoku vypadá takto: v okamžiku, kdy družstvo ukončuje svou přípravu na základně, zmáčkne startér tlačítko synchronizace SYNC. Poté musí vyčkat, dokud se mu na LCD nezobrazí informace o dokončení synchronizace. Duální signalizace k LCD je rozsvícení indikační diody, které může být pro startéra snáze viditelné.

Poté se může přistoupit k samotnému startu, který se provádí výstřelem z pistole. V případě předčasného odstartování některého ze závodníků startér vystřelí podruhé a vrátí závodníky na start. Poté musí provést restart časomíry tlačítkem RESET a vyčkat na

oznámení na LCD o připravenosti časomíry k měření. Synchronizace se podruhé provádět nemusí. Po úspěšném odstartování může dojít k tomu, že družstvo nesrazí všechny terče a nedokončí úspěšně pokus. Čas sražených terčů je však potřeba zapsat do výsledkové listiny. K tomu slouží tlačítko STOP, kterým se hlavní řídicí jednotce časomíry signalizuje, že je pokus ukončen jako neplatný. Před dalším pokusem se provede vynulování časomíry tlačítkem RESET, provede se znovu synchronizace a může se opět startovat.

## Zapojení obvodu modulu

Opět byl použit mikrokontrolér PIC18F47J53, který sice má pro toto použití zbytečně velkou výbavu, ale s množstevní slevou vychází levněji, než méně vybavené modely. Modul je napájen 4,8 V akumulátorem přes 3,3 V stabilizátor napětí LD1117DT33. Spínač v pistoli uzavírá okruh, který vede přímo na pin externího přerušení INT0. Podobně je to s tlačítky SYNC, RESET a STOP, které jsou připojeny na piny RB5, RB6 a RB7 vyvolávající externí přerušování od portu B. Optočleny v tomto případě není potřeba a jen by zvyšovaly cenu a velikost DPS. Zákmity jsou ošetřeny v softwaru. LCD je připojeno na piny RD0 až RD5 a indikační dioda je na pinu RE0. RF modul je připojen na piny modulu SPI1 a piny přemapovatelného externího přerušování INT1 a INT2. Pro taktování lokálních hodin modulu je použit 1 MHz oscilátor s přesností 10 ppm. Blokové schéma zapojení je na obrázku 9.1.



Obrázek 9.1: Blokové schéma zapojení bezdrátového modulu startovní pistole

## 9.2 Moduly terčů/optických závor

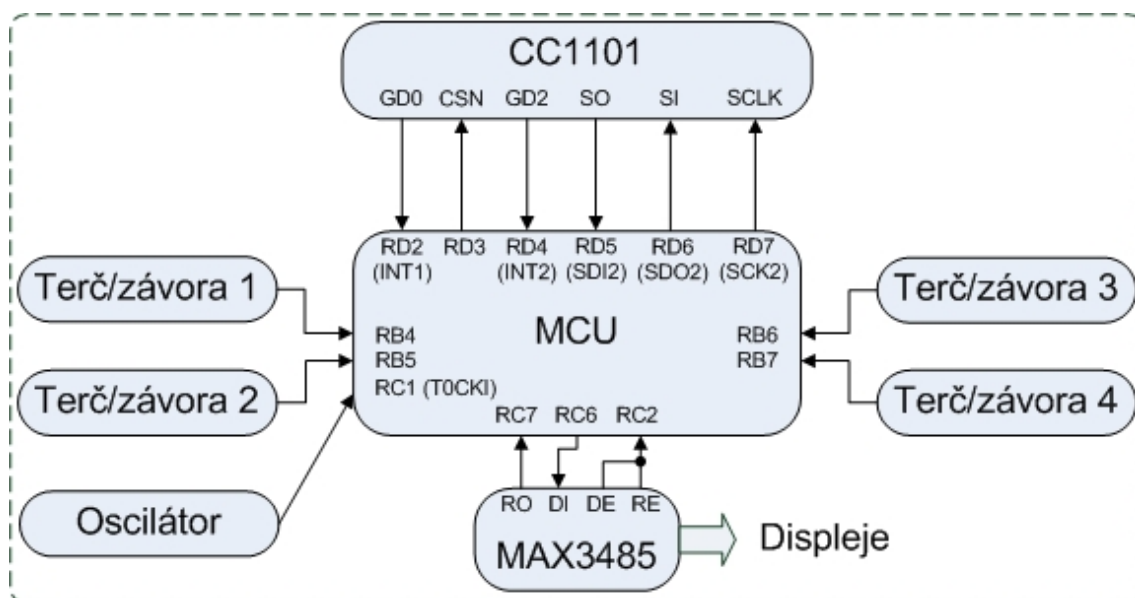
Tyto moduly zpracovávají signály ze spínačů terčů při požárním útoku nebo od optických závor jednotlivých drah při atletických disciplínách. Časové značky nastálých událostí poté bezdrátově odesílají do hlavní řídicí jednotky časoměry. Dále je možné k modulu připojit prostřednictvím RS485 sběrnice jednořádkové displeje, které zobrazují dosažené časy terčů/atletických drah. Tyto časy se po odeslání časové značky vrací zpět z hlavní řídicí jednotky. Každý modul může obsluhovat čtyři senzory a čtyři displeje.

Z modulů jsou napájeny signalizační světla terčů nebo optické závory drah. Proto je potřeba zařízení napájet 12 V autobaterií, která má dostatečnou kapacitu. Případné displeje terčů/drah však musí být napájeny ze sítě, proto je vhodné do modulů umístit i průmyslový zdroj, aby nebylo nutné používat autobaterii, když je stejně u terčů natažena síť.

### Obvodová realizace

Opět je použit mikrokontrolér PIC18F47J53 z důvodů uvedených výše. Zapojení je podobné obvodu vstupního MCU z hlavní řídicí jednotky. Jsou zde tedy tři napájecí domény: 12 V přímo ze zdroje či baterie, 5 V z napěťového stabilizátoru LM340S-5.0 pro optočleny a 3,3 V větev pro zbylou elektroniku napájenou ze stabilizátoru LD1117DT33.

Přes senzory jsou uzavírány okruhy rozsvěčující diody optočlenů, přes které jsou do MCU posílány 5 V signály. Ty jsou připojeny na piny RB4 až RB7, které jsou schopny vyvolat externí přerušení. Na přemapovatelné piny modulu SPI2 a externích přerušení INT1 a INT2 je připojen RF modul s čipem CC1101. RS485 transceiver MAX3485 je připojen na piny modulu EUSART1. Na přemapovatelný pin T0CKI externího zdroje hodin je připojen oscilátor s frekvencí 1 MHz a přesností 10 ppm, který slouží pro taktování lokálních hodin modulu. Schéma zapojení je na obrázku 9.2.



Obrázek 9.2: Blokové schéma zapojení bezdrátového modulu terčů/optických závor

### 9.3 Vyhodnocení parametrů bezdrátové komunikace

Proces měření probíhal s hlavní řídicí jednotkou časomíry, bezdrátovým modulem startovní pistole a bezdrátovým modulem terčů/závor. Funkce modulů byla simulována na DPS řídicích jednotkách externích displejů. Hlavním cílem měření bylo ověřit spolehlivost komunikace a přesnost časové synchronizace modulů. Kapacita bezdrátového řešení mohla být ověřena jen pro tři zařízení, protože jich nebylo více k dispozici. Tvůrci použitého protokolu SimpliTI však uvádí, že bez problémů zvládá síť s 30 až 50 zařízeními a teoreticky je kapacita omezena jen 32bitovým adresovým prostorem.

Bezdrátová zařízení by měla být schopna komunikovat minimálně na vzdálenost 100 m. V podkapitole 7.3 bylo pomocí testovací sady zjištěno, že zakoupené RF moduly s čipem CC1101 jsou schopny komunikovat až do vzdálenosti 300 m. Přesto však bylo nutné ověřit dosah a spolehlivost komunikace i při nasazení RF modulů v reálné aplikaci. Bez použití testovací sady však bylo problematické sledovat úroveň signálu a počet ztracených paketů. Jednoduchá indikace problému je dána tím, že hlavní řídicí jednotka prostě nezachytí paket se zprávou a neprovede předpokládanou akci. Pro potřeby ladění to však nestačí. Proto bylo využito USB rozhraní vyvedené na DPS řídicích jednotek externích displejů, přes které byly posílány informace o nastálých událostech a hodnotě signálu do PC do jednoduché logovací aplikace.

V průběhu měření bylo zjištěno, že úroveň signálu podstatně klesá pokud jsou zařízení v pohybu. Pak dochází i ke ztrátám paketů. Pokud však byla všechna zařízení v klidu, probíhala komunikace v pořádku. Během měření byla největší vzdálenost mezi modulem pistole a terčů 200 m, kdy hlavní řídicí jednotka byla 50 m od pistole a 150 m od terčů. Úroveň signálu při komunikaci mezi moduly byla v tomto případě na přijatelné hodnotě -85 dBm. Ke ztrátám paketů sice občas docházelo, díky implementaci znovuodeslání paketu po vypršení času na potvrzení příjmu, to však nemělo vliv na funkci systému časomíry. Dalším poznatkem je, že kvalita signálu je velmi ovlivněna vzájemným natočením antén. Všechny antény musí být kolmé k zemskému povrchu, jinak je rapidně snížen dosah komunikace.

Přesnost časové synchronizace bezdrátové komunikace byla měřena s pomocí druhé hlavní řídicí jednotky, která byla vyrobena pro SDH Brušperk. Výstupy ze startovní pistole a terčů byly paralelně připojeny k oběma časomírám. K první napřímo pomocí kabeláže a druhá využívala bezdrátové připojení. Poté bylo provedeno několik kontrolních měření a byly porovnávány časy změřené časomírami. Měření probíhalo s bezdrátovými moduly ve vzdálenosti 100 m od sebe a s hlavní řídicí jednotkou ve středu mezi moduly.

Výsledky experimentování jsou v tabulce 9.1. Typická délka provedení pokusu při požárním útoku i běhu na 100 m s překážkami je 15 až 20 s. Při takto dlouhých měřeních se dosažené časy na časomírách nelišily. U měření okolo 60 s, které se na závodech vyskytují málo, ale přece jen vyskytují, se již dosažené časy začaly lišit o tisícinu sekundy, průměrný rozdíl ve změřených časech byl 0,6 ms. Pravidla umožňují maximální délku pokusu 120 s, při které se časy na časomírách lišily nejvíce o 3 ms, průměrně pak o 2,1 ms.

Příhlédne-li se k deklarované přesnosti RBS až 1,6  $\mu$ s, je chyba měření 3 ms na intervalu 120 s poměrně velká. Od referenční implementace RBS se však implementace synchronizace v této práci lehce liší – např. v použitých krystalech pro taktování hodin a přesném výpočtu offsetu hodin modulů. Do celkové chyby měření navíc přispívá více zdrojů nepřesností.

Zprv se liší se způsob výpočtu času při použití kabeláže a při bezdrátové komunikaci. S kabeláží se o taktování čítače hodin stará 1 MHz oscilátor s přesností 10 ppm a čas je počítán pouze v hlavní řídicí jednotce. Zatímco lokální hodiny bezdrátových modulů jsou na použité provizorní DPS taktovány 4 MHz krystalem mikrokontroléru s přesností 30 ppm.



Číslo měření	Rozdíl časů na intervalu [ms]			
	15 s	20 s	60 s	120 s
1	0	0	1	3
2	0	0	1	3
3	0	0	0	2
4	0	0	1	1
5	0	0	1	2
6	0	0	0	2
7	0	0	0	1
8	0	0	1	3
9	0	0	0	3
10	0	0	1	1
<b>Průměrný rozdíl časů</b>	0	0	0,6	2,1

Tabulka 9.1: Výsledky měření přesnosti časové synchronizace bezdrátových zařízení

Výsledný čas je pak vypočítán z časových značek doručených do hlavní řídicí jednotky.

Další nepřesnost je do měření zanesena úpravou frekvence krystalu mikrokontroléru bezdrátových modulů, jenž je nejprve znásobena přes PLL (Phase-Locked Loop) na 96 MHz a poté dělena soustavou děliček na výsledné 3 MHz.

Teoretická chyba měření vzniká kvůli rozdílu v přesnosti krystalů a frekvenci lokálních hodin lze vypočítat vztahem 9.1. Tato chyba je přímo úměrná délce měřeného intervalu. Při 120 s je teoretická chyba rovna 2,4 ms, což přibližně odpovídá změřeným hodnotám.

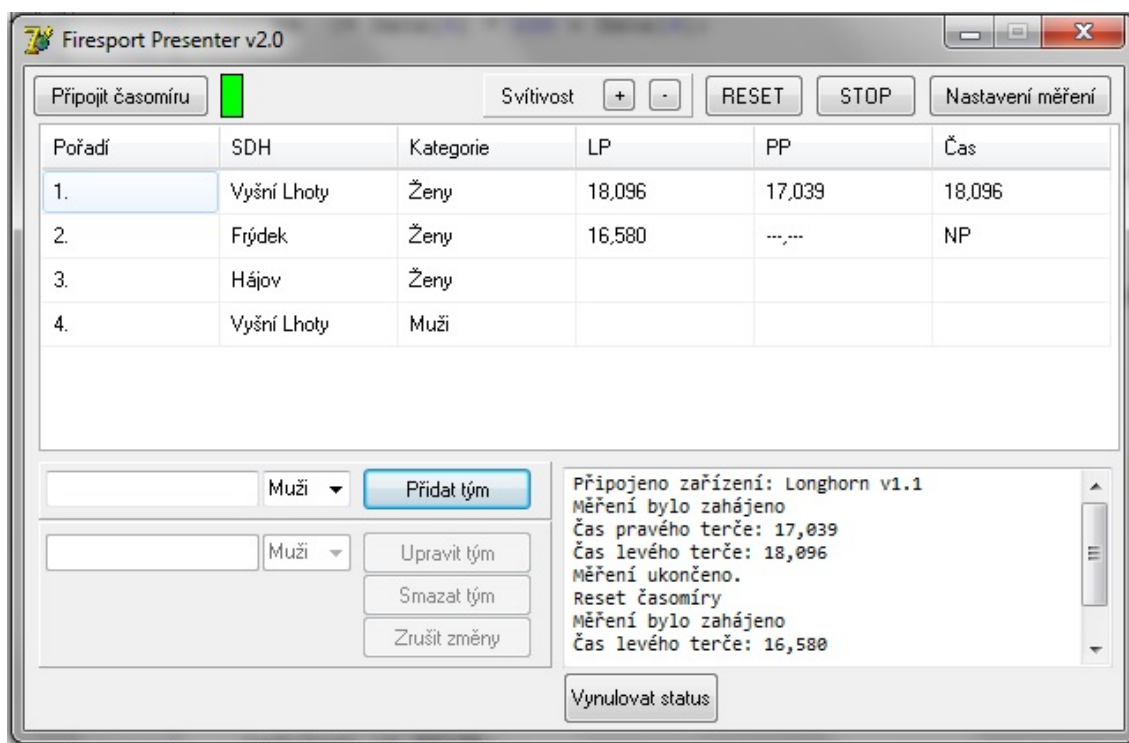
$$err = \left| \frac{t}{1000000} * ppm_1 - \frac{t}{1000000} * ppm_2 \right| \quad [s] \quad (9.1)$$

Přesnost měření bude zvýšena při použití DPS určených přímo pro bezdrátové moduly. Na DPS řídicích jednotek externích displejů, které byly použity pro měření, se totiž nepočítá s použitím přesného oscilátoru, protože displeje nepotřebují synchronizaci. Návrh obvodů bezdrátových modulů však počítá se stejným oscilátorem, jaký je použit v hlavní řídicí jednotce. Tím bude chyba definovaná vztahem 9.1 eliminována.

## Kapitola 10

# Desktopová aplikace

Aplikace pro PC slouží ke sběru časů z hlavní řídicí jednotky časomíry, nastavení systému a ovládání časomíry. K počítači se hlavní řídicí jednotka připojuje prostřednictvím USB kabelu typu A-A. S jednotkou se komunikuje jako s USB HID zařízením. Pro vývoj aplikace byla použita zkušební verze prostředí RAD Studio XE4 využívající Delphi. Aplikaci tak bylo možné vyvinout v poměrně krátkém čase, zejména díky existenci knihovny pro komunikaci s USB HID zařízeními a množství tutoriálů. Také GUI aplikace bylo možné vyvinout velmi rychle a pohodlně díky vestavěnému editoru.

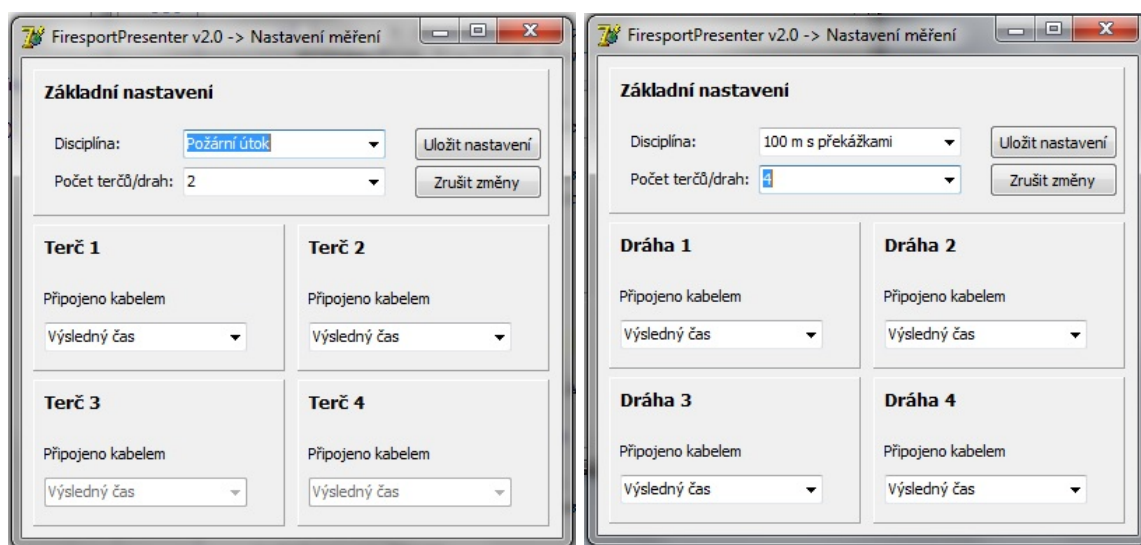


Obrázek 10.1: Hlavní okno aplikace v módu měření požárního útoku

Rozložení hlavního okna aplikace po spuštění programu je na obrázku 10.1. V základním nastavení je aplikace v režimu měření požárního útoku na dva terče. Tomu odpovídají ovládací prvky v levém dolním rohu okna a tabulka pro změřené časy. Časomíra se k aplikaci

připojuje automaticky, což je oznámeno zezelenáním políčka v levém horním rohu okna. Pokud k připojení nedojde automaticky, může uživatel provést další pokus o připojení stiskem tlačítka „Připojit časomíru“. Na horní hraně okna aplikace jsou tlačítka pro ovládání a nastavení časomíry. Tlačítka „+“ a „-“ ovládají svítivost externích displejů systému časomíry. Vynulování měření se provádí tlačítkem „RESET“, ukončení měření se provede stiskem „STOP“.

Tlačítko „Nastavení měření“ otevře nové okno, ve kterém může uživatel změnit mód měření, počet senzorů a zda daný senzor měří výsledný, nebo průběžný čas. Okno s nastavením je na obrázku 10.2. V horní části lze přepnout disciplínu a počet terčů, či drah, které se měří. Vybírat lze mezi požárním útokem a během na 100 m s překážkami a dvěma až čtyřmi senzory. Dále jsou zde tlačítka pro uložení nebo zrušení změn nastavení.

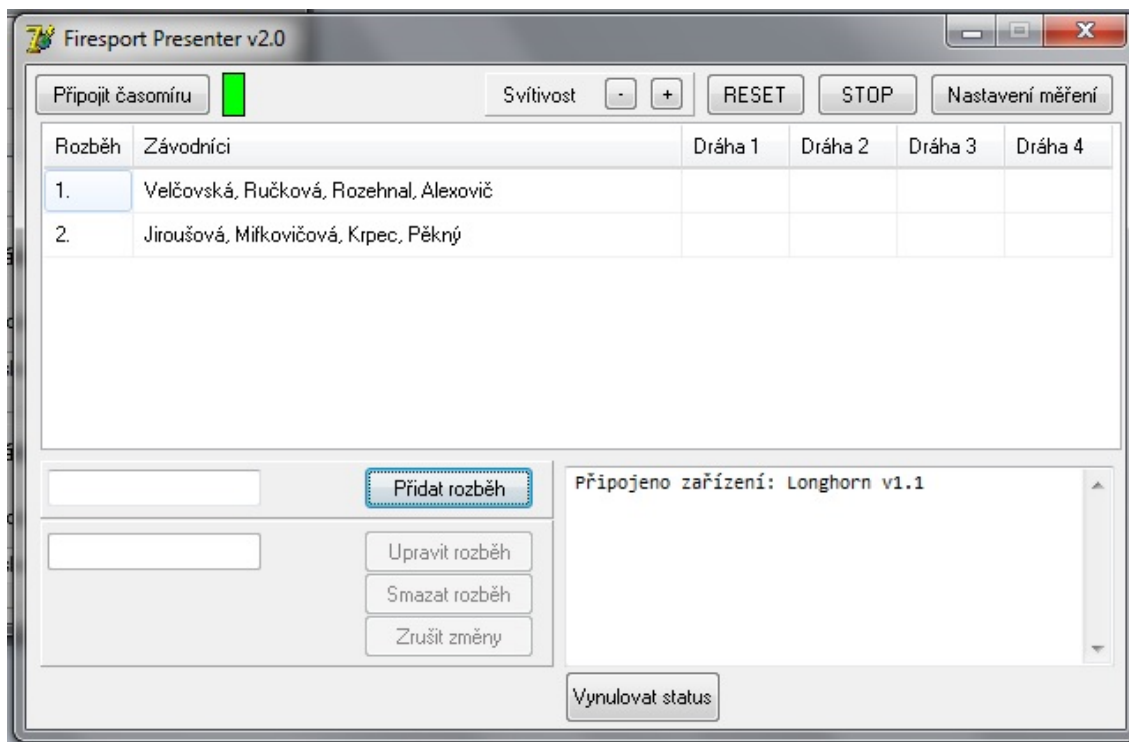


Obrázek 10.2: Okno pro nastavení měření

Pod těmito prvky jsou sekce pro čtyři senzory, které informují uživatele o způsobu jejich připojení a umožňují měnit jejich nastavení. Pokud nepříjde informace o bezdrátovém připojení senzorů, předpokládá se, že jsou senzory připojeny pomocí klasické kabeláže. Hlavní řídicí jednotka nedisponuje prostředky k detekci senzorů na drátových spojích, proto si toto nastavení musí pohlídat uživatel. U bezdrátové komunikace již však detekce probíhá automaticky a u senzoru se vypíše, ke kterému bezdrátovému modulu je připojen. Uživatel pak může nastavit, zda daný senzor měří výsledný, nebo jen průběžný čas.

Změna módu měření a počtu senzorů se po uložení nastavení projeví na ovládacích prvcích a tabulce s výsledky v hlavním okně aplikace. Na obrázku 10.3 je vidět, jak se změni rozhraní pro disciplínu běh na 100 m s překážkami a čtyři dráhy.

Soutěžní družstva nebo závodníci účastníci se rozběhu se do výsledkové tabulky vkládají prostřednictvím textového pole a tlačítka „Přidat tým“ nebo „Přidat rozběh“ (v závislosti na měřené disciplíně). U požárního útoku pak lze navíc specifikovat, zda se jedná o mužský, nebo ženský tým. Řádek tabulky pak lze dodatečně upravit dvojklikem myši na něj, kdy se data nahrají do sekce okna pro úpravy. Změny lze uložit tlačítkem „Upravit tým“ nebo „Upravit rozběh“. Řádek je možné i smazat pomocí „Smazat tým“ nebo „Smazat rozběh“.



Obrázek 10.3: Hlavní okno aplikace v módu měření běhu na 100 m s překážkami

Z časomíry poté přicházejí změřené časy, které se doplňují do sloupců tabulky na aktuální řádek. Uživatel tedy zadá týmy nebo rozběhy v jejich chronologickém pořadí a časy pokusů se poté doplňují řádek po řádku. Pokud při požárním útoku není pokus dokončen, je k nesraženým terčům doplněn text „—, —“ a místo výsledného času je zapsáno „NP“, tedy neplatný pokus. Při běhu na 100 m s překážkami je po ukončení měření rozběhu k drahám bez doručeného času doplněno „NP“, což znamená, že závodník na dráze nedokončil pokus.

V pravém dolním rohu je poslední komponenta okna aplikace, kde se logují události, které nastaly při běhu aplikace. Vypisují se zde např. informace o připojeném časomíře, události jako start, reset nebo ukončení měření a doručené časy. Zaznamenaná data lze z textového okna vymazat stiskem tlačítka „Vynulovat status“.

# Kapitola 11

## Závěr

Cílem této práce bylo seznámit se s problematikou časomíry v oblasti požárního sportu, možnostmi realizace vestavěných zařízení vhodných pro tyto účely a bezdrátovými technologiemi, kterými by bylo možné nahradit připojení senzorů a zobrazovacích prvků. Dále navrhnout flexibilní modulární systém časomíry, který bude reagovat na požadavky dané soutěže a který bude navržen s ohledem na úsporu drátových spojů. Tento systém následně implementovat a vyhodnotit jeho parametry s ohledem na spolehlivost a kapacitu navrženého bezdrátového řešení. Cíl práce byl splněn.

V práci jsem popsal disciplíny požárního sportu, které potřebují měření elektronickou časomírou. Poté jsem vysvětlil požadavky přepojovacích soutěží v požárním útoku na proměnný počet senzorů a nutnost navržení systému bezdrátové komunikace.

Nastudoval jsem legislativu České republiky týkající se volných frekvenčních pásem pro provoz bezdrátových zařízení krátkého dosahu a zvolil pásmo 868 MHz. Dále jsem nastudoval parametry a možnosti obvodů pro bezdrátovou komunikaci aktuálně dostupných na trhu a zvolil bezdrátový transceiver CC1101 od firmy Texas Instruments. Představil jsem několik bezdrátových komunikačních protokolů, z nichž je pro mou aplikaci vhodný protokol SimpliciTI rovněž od firmy Texas Instruments.

Následně jsem navrhl modulární systém časomíry využívající jak drátové, tak i bezdrátové spoje. Systém umožňuje připojit proměnný počet terčů (nebo optických závor) a displejů. Řízení displejů je navrženo tak, aby se dal jednoduše měnit počet řádků. Bezdrátové řešení připojení senzorů a displejů umožňuje flexibilně reagovat na požadavky dané soutěže. Drátové propojení komponent systému je zachováno kvůli kompatibilitě se stávajícím řešením časomíry navrženým v mé bakalářské práci.

V další části práce jsem popsal implementaci navrženého systému, tedy realizaci hlavní řídicí jednotky časomíry, řídicí jednotky externího displeje a bezdrátových modulů pro komunikaci se startovní pistolí a senzory. Dále jsem představil možnosti bezdrátových transceiverů CC1101 a knihovny protokolu SimpliciTI a popsal jsem princip použité časové synchronizace bezdrátových zařízení na základě algoritmu Reference Broadcast Synchronization. Nakonec jsem představil desktopovou aplikaci pro sběr časů z časomíry a pro ovládání a nastavení systému.

Celkem byly vyrobeny dva systémy elektronických časomír. První je vybaven dvouřádkovým externím displejem s číslicemi o výšce 260 mm a k propojení komponent systému používá pouze klasickou kabeláž. Tuto časomíru úspěšně využívá v ostrém provozu na trénincích i soutěžích v požárním útoku SDH Brušperk.

Druhý vyrobený systém obsahuje navíc i bezdrátové moduly pro komunikaci se senzory. Tento systém si ponechávám ve svém vlastnictví pro účely dalšího testování a pro potřeby mého domovského SDH Vyšší Lhoty. Korektní činnost systému byla ověřena na trénincích s připojením terčů a startovní pistole pomocí bezdrátových modulů. Bezdrátově byl připojen i externí displej. V praxi nebyl zaznamenán případ, kdy by došlo k selhání komunikace mezi komponentami systému.

Do budoucna plánuji výrobu optických závor pro měření atletických disciplín. Dále je možné rozšiřovat funkci desktopové aplikace, například pro účely prezentace výsledků na velkoplošné obrazovce nebo pro vkládání výsledků prostřednictvím internetu na portál *www.firesport.eu*, s jehož majitelem jsem předběžně domluven.

# Literatura

- [1] *Směrnice hasičských sportovních soutěží pro muže a ženy* [online]. 2011, [rev. 2011-06-16] [cit. 2014-01-03]. Dostupné na: <<http://www.dh.cz/dokumenty/smernice-pravidla/smernice2012.pdf>>.
- [2] ŠOSTÝ, R. *Časomíra/stopky na embedded počítači*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií, 2012. 37 s. Bakalářská práce.
- [3] HASIČSKÝ ZÁCHRANNÝ SBOR ČESKÉ REPUBLIKY. *Požární sport* [online]. 2010 [cit. 2013-12-30]. Dostupné na: <<http://www.hzscr.cz/clanek/pozarni-sport-439064.aspx>>.
- [4] OFICIÁLNÍ INFORMAČNÍ SERVER SDRUŽENÍ HASIČŮ ČECH, MORAVY A SLEZSKA. *O nás* [online]. 2008, [rev. 2013-06-26] [cit. 2013-12-30]. Dostupné na: <[http://www.dh.cz/index.php?option=com\\_content&view=article&id=1&Itemid=2](http://www.dh.cz/index.php?option=com_content&view=article&id=1&Itemid=2)>.
- [5] KOCÁB, T. *Požární sport - TRV elektronik* [online]. 2012 [cit. 2014-01-03]. Dostupné na: <<http://www.trv-kocab.cz/cs/9-pozarni-sport>>.
- [6] ČESKÝ TELEKOMUNIKAČNÍ ÚŘAD. *Všeobecné oprávnění č. VO-R/10/03.2007-4 k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení krátkého dosahu* [online]. 2007 [cit. 2013-12-30]. Dostupné na: <[http://www.ctu.cz/1/download/OOP/Rok\\_2007/VO\\_R\\_10\\_03\\_2007\\_4.pdf](http://www.ctu.cz/1/download/OOP/Rok_2007/VO_R_10_03_2007_4.pdf)>.
- [7] *Datasheet produktu XTR-7020A-4 výrobce Aurel s.p.a.* [online]. [cit. 2013-12-30]. Dostupné na: <[http://www.aurelwireless.com/wp-content/uploads/shortform/650200925G\\_sf.pdf](http://www.aurelwireless.com/wp-content/uploads/shortform/650200925G_sf.pdf)>.
- [8] *Datasheet produktu XTR-7020A-8 výrobce Aurel s.p.a.* [online]. [cit. 2013-12-30]. Dostupné na: <[http://www.aurelwireless.com/wp-content/uploads/shortform/650200998G\\_sf.pdf](http://www.aurelwireless.com/wp-content/uploads/shortform/650200998G_sf.pdf)>.
- [9] *Datasheet produktu XTR VF 2.4 LP výrobce Aurel s.p.a.* [online]. [cit. 2013-12-30]. Dostupné na: <[http://www.aurelwireless.com/wp-content/uploads/shortform/650201025G\\_sf\\_en.pdf](http://www.aurelwireless.com/wp-content/uploads/shortform/650201025G_sf_en.pdf)>.
- [10] *Datasheet produktu nRF905 výrobce Nordic Semiconductor* [online]. [cit. 2013-12-30]. Dostupné na: <[http://www.nordicsemi.com/eng/content/download/2452/29528/file/Product\\_Specification\\_nRF905\\_v1.5.pdf](http://www.nordicsemi.com/eng/content/download/2452/29528/file/Product_Specification_nRF905_v1.5.pdf)>.

- [11] *Datasheet produktu CC1101 výrobce Texas Instruments* [online]. [cit. 2013-12-30]. Dostupné na: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc1101.pdf>>.
- [12] *Datasheet produktu CC1190 výrobce Texas Instruments* [online]. [cit. 2013-12-30]. Dostupné na: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc1190.pdf>>.
- [13] *ZigBee - National Instruments* [online]. 2013 [cit. 2014-01-05]. Dostupné na: <<http://www.ni.com/white-paper/7118/en/>>.
- [14] GISLASON, D. *Zigbee wireless networking*. 1. Amsterdam: Elsevier / Newnes, 2008. 425 s. ISBN 978-0-7506-8597-9.
- [15] *Microchip MiWi Wireless Networking Protocol Stack* [online]. [cit. 2014-01-03]. Dostupné na: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/AN1066e.pdf>>.
- [16] *CC1101 Wireless Module w/ External Antenna* [online]. 2013 [cit. 2014-05-20]. Dostupné na: <<http://www.dx.com/p/cc1101-wireless-module-w-external-antenna-blue-160898>>.
- [17] FRIEDMAN, L. *SimpliciTI: Simple Modular RF Network Specification* [online]. 2007 [cit. 2014-05-20]. Dostupné na: <<http://vip.gatech.edu/wiki/images/a/ad/SimpliciTI+Specification.pdf>>.
- [18] ELSON, J., GIROD, L. a ESTRIN, D. Fine-Grained Network Time Synchronization using Reference Broadcasts. In *Proceedings of the 5<sup>th</sup> Symposium on Operating Systems Design and Implementation* [online]. Boston, Massachusetts, USA: The USENIX Association, december 2002 [cit. 2014-05-20]. S. 147–163. Dostupné na: <[https://www.usenix.org/legacy/event/osdi02/tech/full\\_papers/elson/elson.pdf](https://www.usenix.org/legacy/event/osdi02/tech/full_papers/elson/elson.pdf)>. ISBN 978-1-4503-0111-4.