

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV POČÍTAČOVÝCH SYSTÉMŮ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY  
DEPARTMENT OF COMPUTER SYSTEMS

## BEZDRÁTOVÁ KOMUNIKACE V OBLASTI POŽÁRNÍHO SPORTU

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

TOMÁŠ PELKA

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV POČÍTAČOVÝCH SYSTÉMŮ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY  
DEPARTMENT OF COMPUTER SYSTEMS

# BEZDRÁTOVÁ KOMUNIKACE V OBLASTI POŽÁRNÍHO SPORTU

WIRELESS COMMUNICATION IN FIRE SPORT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

TOMÁŠ PELKA

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ZDENĚK VAŠÍČEK, Ph.D.

BRNO 2015

## Abstrakt

Tato práce se zabývá návrhem bezdrátové časomíry pro disciplíny požárního sportu. Cílem je nahradit dlouhé kabelové rozvody bezdrátovými spoji při zachování srovnatelné, nebo lepší spolehlivosti. S tím souvisí potřeba synchronizovat hodiny mezi jednotlivými bezdrátovými moduly. Důležitou částí práce je proto návrh a implementace vhodného synchronizačního algoritmu a komunikačního protokolu. Navržený systém byl realizován formou prototypu na vývojové platformě Texas Instruments LaunchPad EXP430FR4133 s využitím bezdrátových modulů s čipem Texas Instruments CC1101. Parametry navrženého systému časomíry (zejména přesnost synchronizace a měření) byly ověřeny v laboratorních podmínkách.

## Abstract

This work describes the design of wireless timer for fire sport disciplines. Its aim is to replace long wires with wireless communication while preserving equal or better reliability. Important part is the need for clock synchronization between wireless modules. Related topic is selection of suitable synchronization algorithm and communication protocol. The proposed system was realized in form of prototype using Texas Instruments's development platform LaunchPad EXP 430 FR4133 and wireless modules with Texas Instruments's chip CC1101. Parameters of designed system (especially the accuracy of time synchronization and measurement) were verified in laboratory.

## Klíčová slova

bezdrátová časomíra, synchronizace hodin, synchronizace času, bezdrátová komunikace, 868 MHz, NTP, Network Time Protocol, IEEE 1588-2008, PTP, Precision Time Protocol, RBS, Reference Broadcast Synchronization, CC1101, SimpliTI, MSP430, MSP430FR4133, FIT-kit, požární sport

## Keywords

wireless timer, wireless stopwatch, clock synchronization, time synchronization, wireless communication, 868 Mhz, NTP, Network Time Protocol, IEEE 1588-2008, PTP, Precision Time Protocol, RBS, Reference Broadcast Synchronization, CC1101, SimpliTI, MSP430, MSP430FR4133, FITkit, fire sport

## Citace

Tomáš Pelka: Bezdrátová komunikace v oblasti požárního sportu, bakalářská práce, Brno, FIT VUT v Brně, 2015

# Bezdrátová komunikace v oblasti požárního sportu

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením pana Ing. Zdeňka Vašíčka, Ph.D.

.....

Tomáš Pelka  
19. května 2015

## Poděkování

Rád bych poděkoval panu Ing. Zdeňku Vašíčkovi, Ph.D. za vedení práce a odbornou pomoc při jejím vypracování. Také bych chtěl poděkovat za pořízení vývojových modulů.

© Tomáš Pelka, 2015.

*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>3</b>
<b>2 Disciplíny a jejich měření</b>	<b>4</b>
2.1 Požadovaná přesnost měření . . . . .	4
2.2 Měření času – startování . . . . .	4
2.3 Běh na 100 m s překážkami . . . . .	5
2.4 Štafeta 4×100 m s překážkami . . . . .	5
2.5 Požární útok . . . . .	6
2.6 Výstup do 4. podlaží cvičné věže . . . . .	8
<b>3 Prvky a funkce elektronické časomíry</b>	<b>9</b>
3.1 Odstartování závodníků . . . . .	9
3.2 Kontrola chybného startu . . . . .	11
3.3 Cílové prvky . . . . .	11
3.4 Hlavní jednotka časomíry . . . . .	12
3.5 Zobrazovací panel . . . . .	12
<b>4 Požadavky na spolehlivé moduly bezdrátové časomíry</b>	<b>13</b>
4.1 Dostupná řešení na trhu . . . . .	13
4.2 Spolehlivost prvků časomíry . . . . .	14
4.3 Moduly . . . . .	17
<b>5 Synchronizace hodin mezi jednotlivými moduly</b>	<b>21</b>
5.1 Přesnost měření času . . . . .	21
5.2 Možnosti synchronizace hodin . . . . .	22
<b>6 Návrh bezdrátové komunikace</b>	<b>27</b>
6.1 Volba frekvence . . . . .	27
6.2 Komunikační protokol . . . . .	28
<b>7 Realizace prototypu</b>	<b>36</b>
7.1 Výběr hardware . . . . .	36
7.2 SimplicíTI . . . . .	37
7.3 Reprezentace času . . . . .	38
7.4 Synchronizace času . . . . .	39
7.5 Persistentní data . . . . .	40

<b>8 Praktické ověření parametrů navrženého řešení</b>	<b>42</b>
8.1 Dosah bezdrátových modulů . . . . .	42
8.2 Přesnost synchronizace . . . . .	43
8.3 Přesnost měření pokusu . . . . .	44
<b>9 Závěr</b>	<b>45</b>
<b>A Vlastní prototyp cílového modulu</b>	<b>50</b>
<b>B Obsah CD</b>	<b>52</b>

# Kapitola 1

## Úvod

Požární sport je skupina několika disciplín, z nichž některé jsou individuální a některé kolektivní. Tyto disciplíny mají společný základ – atletiku. Jedná se o kombinaci rychlosti, síly a obratnosti. Účelem požárního sportu je příprava budoucích i současných, dobrovolných i profesionálních hasičů na výkon jejich povolání. Zároveň se jedná o volnočasovou aktivitu mládeže i dospělých.

Už od počátku požárního sportu bylo třeba měřit a srovnávat výkony soutěžících. První soutěž se datuje v roce 1937. Tímto byla odstartována éra vývoje měřicích přístrojů specializovaných pro jeho disciplíny. Nejprve se používaly mechanické stopky, které byly nahrazeny moderními elektronickými zařízeními. Ty jsou obvykle propojeny kabely, což s sebou nese řadu nevýhod (zdlouhavá instalace, možnost poškození kabeláže, apod.).

Tato práce se zabývá návrhem bezdrátového řešení elektronické časomíry, které umožní nahradit dlouhé kabelové rozvody a zároveň zajistí dobrou spolehlivost. Hlavní výhodou bezdrátového řešení je velmi rychlá instalace zařízení i jeho následný úklid. Díky tomu bude možné časomíru snadno přinést na trénink a prakticky ihned ji využívat.

Pro návrh elektronické časomíry s bezdrátovou komunikací je nezbytné znát jednotlivé disciplíny požárního sportu a způsoby jejich měření. Této problematice se věnuje kapitola 2. V další kapitole (3) budou prozkoumány jednotlivé prvky časomíry a jejich funkce. Na základě znalostí z předchozích kapitol budou v kapitole 4 detailně prozkoumány požadavky a možnosti realizace bezdrátové časomíry s důrazem na její spolehlivost a odolnost. V této kapitole dojde také k průzkumu konkurence (trhu). Stěžejním úkolem byla synchronizace hodin mezi jednotlivými moduly. Různé metody synchronizace a výslednou volbu popíše kapitola 5. Podobně se bude kapitola 6 věnovat bezdrátové komunikaci a vlastnímu komunikačnímu protokolu. Po důkladné analýze dílčích úkolů je možné se v kapitole 7 pustit do realizace prototypu, který poslouží k ověření přesnosti měření a synchronizace (kapitola 8).

## Kapitola 2

# Disciplíny a jejich měření

Disciplíny požárního sportu mají původ v atletice a jsou velmi rychlé. Měřené časy mohou dosáhnout až 2 minut (limit na provedení disciplíny běh na 100 m s překážkami, výstup do 4. podlaží cvičné věže, požární útok), případně 5 minut (limit na provedení disciplíny štafeta 4 x 100 m s překážkami). Zmíněné limity jsou nastaveny dostatečně vysoko a drtivá většina soutěžících dosahuje až několikanásobně kratších časů. O výsledném pořadí dnes často rozhodují desetiny, někdy i setiny sekundy.

Ruční měření času s použitím stopek buď mechanických, nebo digitálních je již historií. K tomuto způsobu měření času se přistoupí pouze v případě selhání elektronické časomíry, která je dnes nejpoužívanějším měřicím zařízením v oblasti požárního sportu.

Popis disciplín uvedený v této kapitole vychází z Pravidel požárního sportu [5], a Směrnic hasičských sportovních soutěží pro muže a ženy [12].

### 2.1 Požadovaná přesnost měření

Všechny disciplíny požárního sportu jsou považovány za velmi rychlé a rozdíly mezi závodníky, nebo družstvy nejsou pouhé sekundy, ale často desetiny, někdy setiny sekundy.

Podle pravidel požárního sportu musí být elektronická časomíra schopná měřit všechny disciplíny s přesností 0,01 s. Při použití přesnější časomíry jsou výsledky zaokrouhlovány, takže případné rozdíly v tisícinách sekund nebudou brány v úvahu.

### 2.2 Měření času – startování

Pokus je odstartován výstřelem z pistole. Při startování se kontroluje chybný start, který může být zapříčiněn:

- předčasným vyběhnutím,
- neuposlechnutím povelu „Pozor!“ v přiměřeném čase,
- nebo opuštěním místa rukou nebo nohou před výstřelem.

Ukončení měření času bude popsáno u každé disciplíny zvlášť.

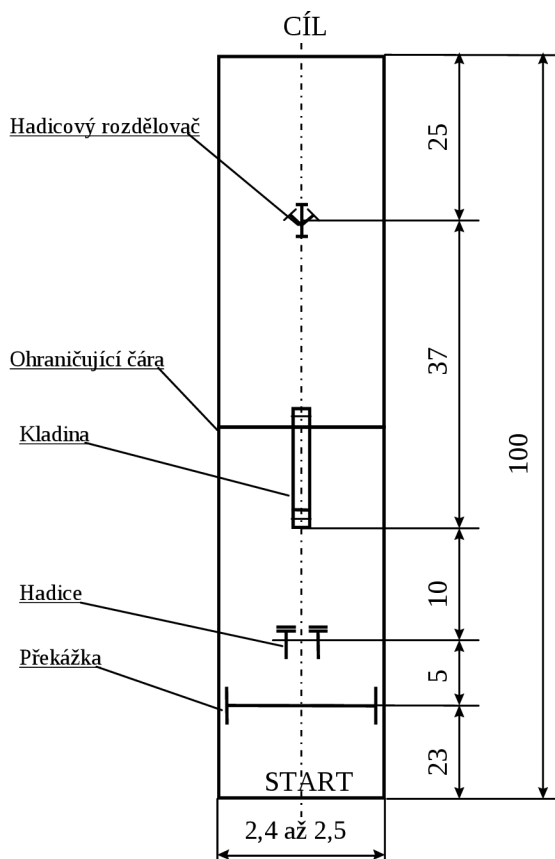


## 2.3 Běh na 100 m s překážkami

Běh na 100 m s překážkami je individuální disciplína – soutěží jednotlivci. Přesto je možné postavit paralelně (vedle sebe) několik drah (obvykle 2 nebo 4) pro urychlení průběhu soutěže. Běžci jsou odstartováni zároveň.

### 2.3.1 Plán trati

Celková délka trati je – jak již název napovídá – 100 m. Plán trati, rozmístění překážek a nářadí je na obrázku 2.1. Start i cíl jsou na různých místech.



Obrázek 2.1: Plán trati běhu na 100 m s překážkami [12]

### 2.3.2 Ukončení pokusu

V případě použití elektronické časomíry je měření času ukončeno, protne-li soutěžící cílový paprsek (optickou bránu). Na provedení pokusu je stanoven limit 2 minuty.

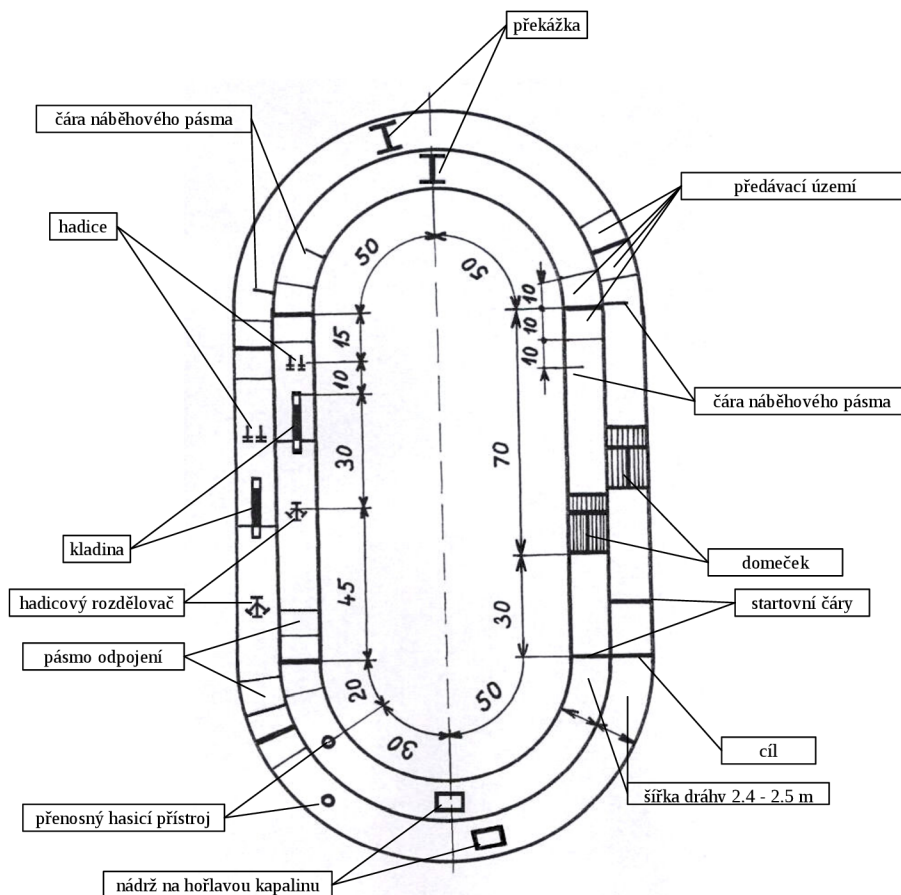
## 2.4 Štafeta 4×100 m s překážkami

Jedná se o skupinovou disciplínu, ve které spolupracují 4 závodníci z jednoho družstva. Na některých soutěžích jsou pro urychlení průběhu startovány 2 štafety zároveň.

### 2.4.1 Plán trati

Tratí je atletický ovál, na kterém závodníci uběhnou celkem 400 m (každý z nich 100metrový úsek). Plán trati, rozmístění překážek a nářadí je na obrázku 2.2.

Start i cíl bývá obvykle na jednom místě. V případě, že startují 2 štafety zároveň, je start druhé z nich posunut. To proto, že celková délka (obvod) vnějšího oválu je větší než u vnitřního.



Obrázek 2.2: Plán trati štafety 4×100 m s překážkami [12]

### 2.4.2 Ukončení pokusu

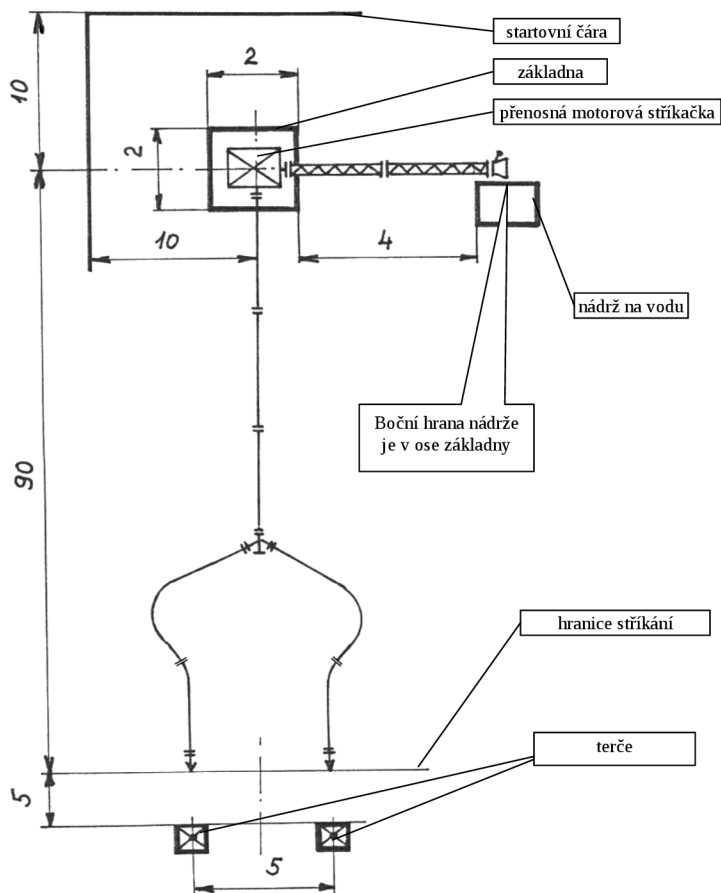
V případě použití elektronické časomíry je měření času ukončeno, protne-li soutěžící cílový paprsek (optickou bránu). Na provedení pokusu je stanoven limit 5 minut.

## 2.5 Požární útok

Požární útok („královská disciplína“) je skupinová disciplína, kterou plní 7 (výjimečně 5 nebo 6) členů družstva.

### 2.5.1 Plán trati

Tratí je obvykle travnatá plocha o celkové délce 105 m, na které je umístěno nářadí podle obrázku 2.3.



Obrázek 2.3: Plán trati požárního útoku [12]

### 2.5.2 Ukončení pokusu

Měření času má být ukončeno při „sražení“, nebo naplnění obou terčů. V případě použití elektronické časomíry se jedná o aktivaci senzorů na obou terčích. Do terčů se závodníci trefují proudem vody. Používají se 2 typy terčů:

- Srážecí – trefit (shodit) klapku umístěnou uprostřed terče.
- Nástřikové – stříkáním vody doprostřed terče je třeba naplnit nádobu o určitém objemu umístěnou v terči.

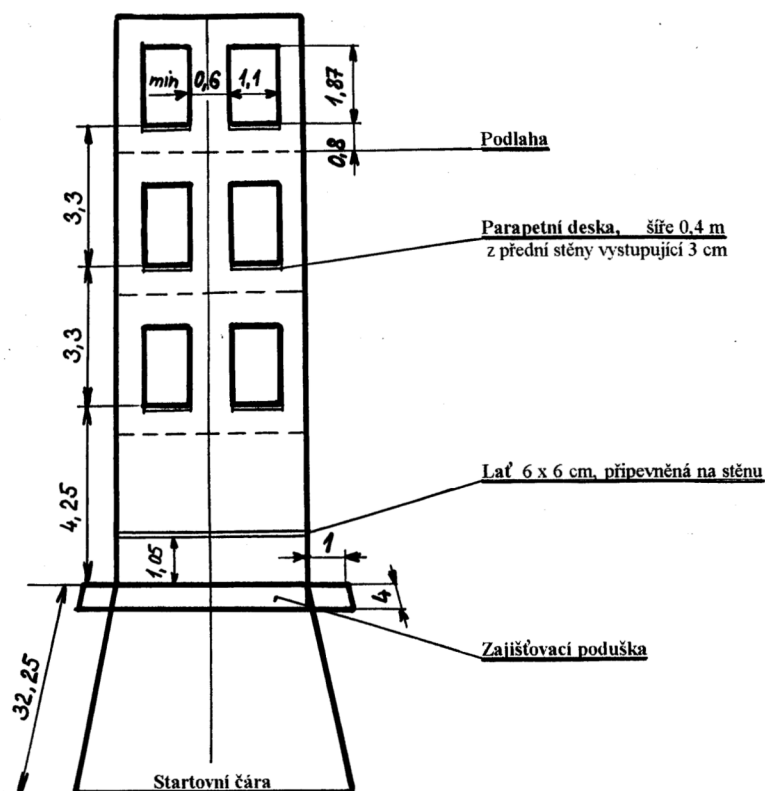
Na provedení pokusu je stanoven limit 2 minuty. Pokusu předchází příprava materiálu s časovým limitem 5 minut.

## 2.6 Výstup do 4. podlaží cvičné věže

Výstup do 4. podlaží cvičné věže je individuální disciplína. Podobně jako běh na 100 m s překážkami je možné postavit paralelně (vedle sebe) několik drah (obvykle 2 nebo 4) pro urychlení průběhu soutěže. Běžci jsou odstartováni zároveň.

### 2.6.1 Plán trati

Trať se skládá z 32,25 m dlouhého náběhu ke cvičné věži o 4 podlažích. Plán trati, včetně náčrtu věže je na obrázku 2.4.



Obrázek 2.4: Plán trati výstupu do 4. podlaží cvičné věže [12]

### 2.6.2 Ukončení pokusu

Měření času je ukončeno, jakmile se závodník dotkne oběma nohama podlahy 4. podlaží. V případě použití elektronické časomíry je tohle zajištěno speciálním cílovým zařízením – dvěma nášlapnými deskami.

## Kapitola 3

# Prvky a funkce elektronické časomíry

V předchozí kapitole byly popsány jednotlivé disciplíny požárního sportu tak, aby bylo možné navrhnout pokud možno univerzální elektronickou časomíru pro všechny disciplíny požárního sportu.

Pravidla požárního sportu neřeší vlastnosti časomíry, a různí pořadatelé soutěží používají různá zařízení. Jednotlivé disciplíny umožňují použití různých způsobů pro odstartování závodníků, měření času ukončení jejich pokusu a další operace. Tyto způsoby se budou snažit napříč disciplínami maximálně sjednotit, abstrahovat. Cílem je minimalizace počtu prvků časomíry specifických pro jednotlivé disciplíny, a naopak navržení prvků univerzálních.

Zde budou popsány všechny klíčové prvky elektronické časomíry, jejich varianty a chování. Samotná časomíra nemusí disponovat všemi funkcemi, ani všemi jejich variantami. Jednalo by se o uživatelsky příliš komplikovaný systém, jehož obsluha a nastavení by nebyla triviální.

Díky této studii by mělo být možné navrhnout časomíru, která má pro všechny varianty stejný základ. To usnadní její údržbu (z pohledu programátora) a rozšiřitelnost.

### 3.1 Odstartování závodníků

V popisu některých disciplín je zmíněna možnost měřit několik drah současně. V takovém případě je odstartována celá skupina závodníků zároveň, není tedy nutné řešit individuálně odstartování jednotlivých drah.

Pokus je odstartován výstřelem z pistole. Výstřel je možné zaznamenat různými způsoby:

- instalací mikrosplínače do běžné pistole,
- snímáním zvuku mikrofonom,
- elektronickou pistolí.

Jsou možné i další způsoby odstartování závodníků, které ale neodpovídají pravidlům. Přesto mohou být vhodné pro účely tréninku – např. automatické odstartování pomocí reproduktoru.

### 3.1.1 Mikrospínač v běžné pistoli

V drtivé většině případů se jedná o expanzní (plynovou) pistoli, k jejíž držení není třeba zbrojní průkaz. Můžete ji vidět na obrázku 3.1.

Do pistole je instalován mikrospínač, který je sepnut při pohybu úderníku. Jedná se o čistě mechanické řešení. Pistole musí být propojena s časomírou. Při nevhodné montáži mikrospínače dochází k jeho rychlému opotřebení a chybné funkci. Může tedy nastat problém, kdy dojde k výstřelu, ale mikrospínač nesepe. Tuto situaci lze minimalizovat vhodnou konstrukcí pistole se spínačem.

V případě selhání časomíry musí být soutěžící (resp. družstvo) vráceno dalším výstřelem, nebo zapískáním. Při selhání mikrospínače by nepomohla ani kombinace se systémem snímání výstřelu mikrofonem – byli bychom pouze schopni zjistit anomálii, ale nikoliv ji vyřešit podle pravidel.

Další problém může nastat po povelu „Pozor!“ a následném stisknutí spouště, kdy bude sice sepnut mikrospínač, ale kvůli selhání pistole nedojde k výstřelu. Startér zavelí Zpět! a řeší vzniklý problém. Družstvo na rozdíl od předchozího případu nemá za sebou zbytečný start (protože neslyšelo výstřel). Tohle selhání pistole nelze nijak předvídat. Lze omezit selhání startéra např. počítáním výstřelů a připomenutím nabíjení pistole (u různých zbraní se může lišit).



Obrázek 3.1: Startovací pistole TRV [20]

### 3.1.2 Snímání výstřelu mikrofonem

Pistole zůstává bez úprav. Výstřel je snímán mikrofonem, který je umístěn blízko startéra. Snímaný zvuk bude zpracován filtry a operačním zesilovačem. Na výstupu bude logický stav, takže je možné tuto variantu připojit podobně jako mikrospínač.

Důležité je správně nastavit citlivost, při které bude snímáný signál považován za výstřel. Přesto může dojít k nechtěnému sepnutí při jiném podnětu, než je výstřel z pistole. Může jím být např. hluk motoru požární stříkačky, případně tzv. střílení z výfuku. Proto je tento způsob nevhodný pro disciplínu požární útok, v ostatních disciplínách je použití možné.

### 3.1.3 Elektronická pistole

Elektronická pistole je vlastně maketa skutečné střelné zbraně. Jediný funkční prvek je spoušť, která spíná mikrospínač. Pistole je propojená se startovací jednotkou časomíry, která

generuje zvuk výstřelu do připojených reproduktorů. Časomíra musí být oproti předchozím variantám vybavena generátorem zvuku a zesilovačem.

Toto řešení se používá např. při olympijských hrách, při požárním sportu není obvyklé.

### 3.1.4 Optickou bránou, bez startéra

Na startovní čáře bude postavena optická brána. Měření času se spustí, jakmile první závodník protne paprsek. Připojení k časomíře je identické, jako v případě použití zařízení kontroly chybného startu (bude popsáno dále).

Tento způsob je vhodný na trénink, kdy není k dispozici startér, nebo je zbytečné opotřebovávat pistoli a plýtvat náboji. Povel startéra může nahradit někdo ze závodníků. Používá se při některých soutěžích na Slovensku.

### 3.1.5 Elektronický startér

Na startu bude umístěn reproduktor, do kterého budou pouštěny nahrané povely startéra. Mezi povely (zejména „Pozor!“ a výstřelem) mohou být různé časové intervaly. Družstvo se tak naučí reagovat až na výstřel, protože prodleva bude pokaždé trochu jiná. V kombinaci s kontrolou chybného startu je to kvalitní příprava na soutěž.

Časomíra musí být vybavena generátorem zvuků a zesilovačem (podobně jako u varianty s elektronickou pistolí). Řídící jednotka musí být speciálně propojena s generátorem zvuků, protože je nutné zvuk vybrat (různé povely startéra, výstřel) a následně zaslat požadavek k jeho přehrání.

## 3.2 Kontrola chybného startu

V kapitole 2 byly popsány pravidla startování a ověření správného startu. Ze zmíněných typů chybného startu je možné elektronicky sledovat předčasné vyběhnutí – optickou bránou.

Optická brána (závora) se obvykle umísťuje před startovní čáru (např. 10 cm). Po odstartování pokusu nesmí být paprsek optické brány protnut dříve, než uplyne minimální reakční doba člověka. Reakční dobu člověka zkoumá reaktometrie a pro startovní výstřel se udává doba mezi 0,1 – 0,25 s.

Při zjištění chybného startu je třeba včas vrátit závodníky zpět na místa. Jedna varianta je signalizace chybného startu startérovi (např. LED diodou), který závodníky vrátí zpět dalším výstřelem z pistole. Hraje zde ale příliš velkou roli lidský faktor. Proto je zde další možnost – instalace zvukového signalizačního prvku (jednotónová siréna, nebo reproduktor). Družstvo bude v případě chybného startu vráceno zvukovým signálem. V případě použití reproduktoru je možné využít dříve zmíněné funkce časomíry: startování elektronickou pistolí (výstřel je přehrán do reproduktoru), elektronický startér (pro účely tréninku).

## 3.3 Cílové prvky

Cílovými prvky mohou být optická brána, terč, nebo dvojice nášlapných desek. Každý takový prvek používá různé typy senzorů pro sledování jejich stavu. Časomíra očekává na svém vstupu pouze logickou hodnotu, což všechny používané cílové prvky splňují.

Rozdíly jsou v chování senzoru – může být rozpínací, spínací, přepínací. Očekávané chování senzorů bude konfigurovatelné softwarově.

Některé cílové prvky mohou signalizovat stav – např. u disciplíny požární útok je rozsvíceno světlo při sražení terče. Je třeba vzít v úvahu, že příkon žárovkového světla může být cca 30 W. Proto je nutné takový výstup dostatečně dimenzovat a pro jeho spínání využít výkonový tranzistor, nebo relé.

### 3.4 Hlavní jednotka časomíry

Hlavní jednotka bývá propojena s dalšími prvky časomíry – startovací pistolí, cílovými prvky, zobrazovacím panelem. Může být také zabudována do zobrazovacího LED panelu, což ale značně omezuje její umístění.

Propojení může být realizováno přímým kabelovým spojením s danými prvky. Další možností je využití sběrnice (např. RS-485), nebo použití bezdrátové komunikace.

V případě použití sběrnice, nebo bezdrátové komunikace jsou prvky časomíry vybaveny speciálním zařízením, které tuto komunikaci zprostředkuje. Takové zařízení může být přímo zabudováno do vybraného prvku časomíry (např. startovací pistole), nebo může být samostatné (např. startovací modul, k němuž bude připojena startovací pistole).

### 3.5 Zobrazovací panel

Zobrazovací panely (displeje) jsou nejvíce variantní ze všech částí časomíry. Mohou mít různý počet znaků i řádků. Menší počet řádků lze kompenzovat např. střídáním několika údajů, nebo větším množstvím zobrazovacích panelů. Hlavním problémem jsou často speciální požadavky jednotlivých organizátorů soutěží, což nyní znemožňuje navržení univerzálního řešení, které bude použitelné se všemi panely.

Dobrý zobrazovací panel musí být čitelný i za přímého slunečního světla. Obvykle je sestaven z LED diod, jejichž jas lze regulovat.

Pro disciplínu požární útok stačí použít jednořádkový panel (příklad na obrázku 3.2, který zobrazí výsledný čas, a případně ho bude střídát s časem rychlejšího sražení terče. U běhů, kterých se účastní více závodníků (nebo družstev), je vhodné mít pro každého závodníka (každé družstvo) zvláštní displej.



Obrázek 3.2: Jednořádkový LED displej [23]



## Kapitola 4

# Požadavky na spolehlivé moduly bezdrátové časomíry

Jednotlivé prvky časomíry mohou být od sebe vzdáleny až 100 m. Při takové délce vedení už nejsou náklady na propojovací kabely zanedbatelné. Přitom hrozí riziko zničení kabelu závodníky, protože je používána obuv s hřeby. Kabely vedou pochopitelně kolem závodní tratě, kde je zvýšený pohyb diváků, kteří mohou kabel také poškodit.

Je proto vhodné zabývat se bezdrátovou komunikací mezi prvky časomíry. Takové řešení s sebou přináší nové problémy, které je nutné řešit. Je nutné navrhnout chování časomíry a její komunikační protokol tak, aby byla co nejvíce odolná rušivým vlivům i běžným poruchám.

Bezdrátové řešení umožní značnou úsporu času při instalaci a následném úklidu časomíry. Málokdy je možné ponechat časomíru na veřejně přístupném hřišti. V případě tréninku tak stačí rozmístit několik bezdrátových modulů, a není vůbec nutné rozmotávat či balit stometrové kabely.

### 4.1 Dostupná řešení na trhu

Při průzkumu trhu (hledáním na internetu) jsem našel několik propracovaných časomír využívající kabelové propoje. Cenové rozpětí je různorodé – od nejlevnějších verzí určených pro výcvik, až po kompletně vybavený kontejner pro nákladní automobil. Spolehlivostí se nezabývá téměř žádný z produktů, některé se alespoň zmiňují o krytí proti vodě.

Dále jsem se zaměřil na hledání prací (středoškolských, bakalářských, apod.) zabývajících se podobným tématem. Některé práce navrhovaly propojení na principu bezdrátových zvonků. Spolehlivost ani přesnost takového systému tedy není zaručena. Pozitivně mě překvapila bakalářská práce Marka Gála [4] a diplomová práce Radima Šostého [27]. Obě se zabývaly bezdrátovou komunikací a řešily také synchronizaci hodin zařízení pomocí různých algoritmů.

Snažil jsem se najít co nejvíc produktů, aby byla zřetelná různorodost časomír uvedených na trh. Následuje jejich seznam s krátkým komentářem:

**THT Polička [11]:** Jedná se o kontejner pro nákladní automobil, který je vybaven časomírou využívající drátové spoje. Na střeše kontejneru je velký zobrazovací panel s úhlopříčkou cca 2 m. Časomíra je schopna měřit všechny disciplíny požárního sportu ve 4 drahách. Každá dráha může být dále vybavena vlastním zobrazovacím panelem. Uvnitř kontejneru je komfortní zázemí pro časoměřiče.

- Libor Valeš [6]:** Tato jednoúčelová časomíra pouze pro požární útok je vyráběna ve dvou variantách – drátová a bezdrátová. Bezdrátová varianta ovšem neřeší synchronizaci, ani spolehlivost přenosu dat. Ke drátové verzi je možné připojit až 3 zobrazovací panely (1 pro diváky, 2 pro závodníky – na každý terč).
- Marek Kysela [7]:** Časomíru je možné zakoupit ve variantě pro 2 nebo 4 dráhy, takže je možné ji využít pro měření všech disciplín požárního sportu. Základní varianta je drátová, ale za symbolický příplatek jsou 100 m kabely nahrazeny bezdrátovým řešením, které neřeší synchronizaci, ani spolehlivost přenosu dat. Naměřené časy lze zobrazit na jednom zobrazovacím panelu, nebo přenést do PC přes rozhraní RS-232.
- TIA Chinchilla Agency s. r. o. [22]:** Poměrně drahá drátová časomíra s doplňkovými funkcemi – měření mezičasů, zobrazení startovního čísla a průběžného pořadí závodníka. Zvláštností je možnost měření několika různých disciplín. Přenos dat do PC je možný realizovat bezdrátově.
- Tomáš Kocáb – TRV elektronik [19]:** Časomíra pro všechny disciplíny požárního sportu podporující 1 nebo 2 dráhy. Drátové řešení je pěkně zpracováno, nabízí se taky bezdrátová varianta bez synchronizace a zajištění spolehlivého přenosu dat. Součástí je software pro PC určený ke sběru naměřených časů a tvorbě výsledkové listiny.
- Michal Vondrák [21]:** Jedná se o závěrečnou práci, ve které byla realizována drátová verze časomíry.
- Petr Novobilský [10], Michal Frydrych [3]:** V obou případech se jedná o závěrečnou práci, která se zabývá realizací bezdrátové časomíry bez jakéhokoliv návrhu spolehlivého řešení přenosu dat a s tím související synchronizací času.
- Marek Gál [4]:** Bakalářská práce, která se zabývá návrhem spolehlivé bezdrátové časomíry se synchronizací pomocí protokolu Precision Time Protocol. Bohužel práce vůbec nezmiňuje konkrétní kroky vedoucí k zajištění spolehlivého přenosu dat, není popsán komunikační protokol. Podle všeho byl dokončen vývoj hardware, ale firmware nebyl ani zdaleka dokončen.
- Radim Šostý [27]:** Diplomová práce, ve které je navržena bezdrátová časomíra s neobvyklou přesností 0,001 s, spolehlivým přenosem dat a synchronizací pomocí Reference Broadcast Synchronization. Použitý synchronizační algoritmus vyžaduje přítomnost nezávislého zařízení, které vyšle referenční zprávu pro spuštění synchronizace. Tím zařízením je startovací pistole, která ovšem musí být synchronizována, a nelze ji proto použít jako nezávislý prvek časomíry ke spuštění synchronizace. Výběr synchronizačního algoritmu mi proto přišel nevhodný.

## 4.2 Spolehlivost prvků časomíry

Kromě spolehlivé bezdrátové komunikace je třeba zaměřit se i na další části časomíry, které mohou způsobit problémy a chyby v měření. Některým problémům lze předejít snadným a levným způsobem.

Obvykle se funkčnost časomíry testuje před začátkem soutěže. Přesto může dojít k poruše v jejím průběhu. Je důležité chybné stavy včas detekovat – nejlépe mezi jednotlivými starty (pokusy). Pokud se objeví chyba v průběhu pokusu, tak bude vynaloženo maximální úsilí o správné změření ukončení pokusu.

### 4.2.1 Stupeň krytí

Všechny koncové prvky jsou z hlediska komunikace s časomírou elektronické. Z jiných úhlů pohledu může jít o elektro-mechanické, nebo elektro-optické zařízení. Takové prvky jsou pochopitelně velmi citlivé na vodu, která se např. při disciplíně požární útok může nechtěně vyskytnout všude (např. při prasknutí hadice).

Odolnost elektrického zařízení proti vniknutí cizího tělesa, nebo kapalin je udána stupněm krytí (podle normy [1]). Je proto důležité zvolit vhodné vnější součástky (konektory, tlačítka, kontrolky) a kryt (krabičku) zařízení, např. ve stupni krytí IP 67 (vodotěsné zařízení).

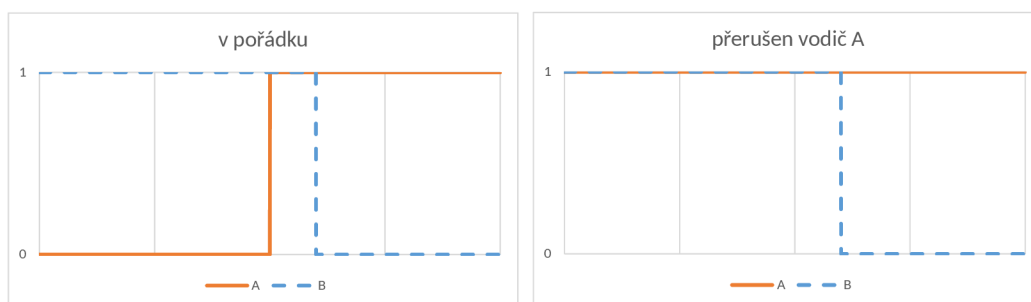
### 4.2.2 Spínače

Spínače jsou nejčastěji se vyskytujícími prvky v časomíře. Mohou být ve startovací pistolí, v terči (disciplína požární útok), nášlapných deskách (výstup do. 4 podlaží cvičné věže).

Běžně jsou používány pouze spínací, nebo rozpínací prvky. Ty jsou s měřicí elektronikou propojeny 2 vodiči. V případě, že dojde k poruše spínače, nebo jeho odpojení (vypadlý konektor, přerušený kabel), tak se na chybný stav nemusí včas přijít a může dojít k neplatnému měření pokusu.

Řešením je použití přepínacích koncových prvků (spínací a rozpínací kontakt zároveň), což nám umožní před začátkem pokusu zjistit chybný stav (signálové vodiče musí mít opačné logické hodnoty). Pokud bychom pro detekci změny stavu koncového prvku požadovali alespoň 1 změnu v signálních vodičích (ne právě 2), tak jsme schopni omezit chybu vzniklou špatným přepínačem, nebo zatečením vody do některé části. Chybný stav bude signalizován časoměřičům.

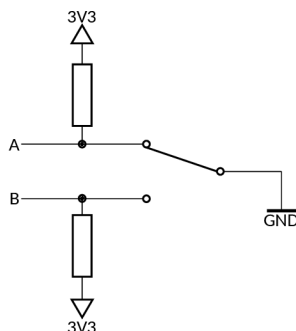
Na obrázku 4.1 vlevo je zobrazen správný průběh signálů při použití přepínacího koncového prvku. Změna stavu koncového prvku je detekována už při první změně (přechod A do 1) a vůbec nevadí, že se přechod B do 0 zpozdil (může být dáno konstrukcí přepínače). Oba signální vodiče jsou opatřeny pull-up rezistory (např. v MCU), zjednodušené schéma zapojení je na obrázku 4.2. Při chybě koncového prvku (příklad na obrázku 4.1 vpravo – přerušen signální vodič A) je tato1 detekována ještě za klidu senzoru, ale i přesto je možné zjistit, kdy byl senzor aktivován.



Obrázek 4.1: Průběhy signálů přepínacího koncového prvku

Výše popsané možnosti detekce chyb nejsou při použití pouze spínacích, nebo pouze rozpínacích prvků možné. Je nutné použít oba předchozí současně, nebo jeden přepínací.

Z tabulky 4.1, která shrnuje možné chyby a jejich detekci, je vidět, že většinu chyb lze detekovat ještě za klidu senzoru a díky tomu nemusí být povolen start pokusu (pro



Obrázek 4.2: Zapojení přepínače (koncového prvku)

maximální spolehlivost). Chyby, které nebyly detekovány za klidu senzoru, ale až po jeho aktivaci, však nemají negativní vliv na vyhodnocení aktivace senzoru.

Bez poruchy	A	B	Zjištěna chyba
Senzor v klidu	0	1	žádná není
Senzor aktivován	1	0	žádná není

Přerušen A	A	B	Zjištěna chyba
Senzor v klidu	1	1	Ano
Senzor aktivován	1	0	Ne

Přerušen B	A	B	Zjištěna chyba
Senzor v klidu	0	1	Ne
Senzor aktivován	1	1	Ano

Nezapojeno	A	B	Zjištěna chyba
Senzor v klidu	1	1	Ano
Senzor aktivován	1	1	Ano

Voda ve spínači	A	B	Zjištěna chyba
Senzor v klidu	0	0	Ano
Senzor aktivován	0	0	Ano

Tabulka 4.1: Přehled možných chyb při použití přepínacího spínače

### 4.2.3 Optická brána

Optická brána většinou neumožňuje použití 2 signálních vodičů s opačnými stavy (jako v případě přepínačů). Proto je vhodné volit takovou optickou bránu, aby její klidový stav byl z pohledu mikrokontroléru rozlišitelný od stavu, kdy nebude brána zapojena (nebo bude zapojena chybně). Jen tak je možné ověřit (alespoň v omezeném rozsahu) připravenost časoměry před každým startem. Dalším řešením je použití proudové smyčky 4–20 mA. Zpracování takové hodnoty je možné buď pomocí AD převodníku (větší požadavky na mikrokontrolér), nebo pomocí operačního zesilovače zapojeného jako komparátor.

**Poznámka:** Optická brána potřebuje vlastní napájení. Pro její připojení jsou obvykle

potřeba 3 vodiče, tedy stejný počet, jako pro přepínací spínač.

#### 4.2.4 Napájení

Většina časomír je napájena z akumulátorů. Je to dáno hlavně nedostupností zásuvek 230 V na hřištích. Výjimkou je pouze hlavní modul časomíry, který je umístěn v technickém zázemí soutěže např. spolu s ozvučovací aparaturou, takže může být napájen ze sítě.

Největší problém je u cílových modulů, ke kterým je obvykle připojena světelná signalizace aktivace senzorů. Spotřeba každého signalizačního světla se pohybuje kolem 30 W. Celodenní provoz časomíry tak vyžaduje větší akumulátor (např. z osobního automobilu). To ale odporuje snadné instalaci časomíry v případě tréninku.

Proto by měl být každý modul časomíry (i hlavní jednotka) vybaven vestavěným akumulátorem. V případě připojení externího napájení bude akumulátor dobíjen. Světelná signalizace u cílových modulů bude napájena pouze z externího zdroje, který ale nemusí být vždy připojen (např. při tréninku).

### 4.3 Moduly

Časomíru jako celek rozdělím na několik modulů, které budou mezi sebou komunikovat bezdrátově. Kritérium na rozdělení je zejména vzdálenost mezi takovými moduly. Pokud bude vzdálenost malá a bude se zvažovat použití drátového propoje, tak je nutné uvědomit si riziko zničení tohoto drátového spoje. Všechna tato kritéria jsou specifická podle soutěžní disciplíny, požadavků organizátorů soutěže, místních podmínek a zvyklostí.

Nejdříve časomíru rozdělím na maximální počet modulů, který bude ještě dávat smysl. Ke každému modulu vytvořím specifikaci. Některé funkce navržených modulů bude možné podle požadavků zákazníka sloučit (kumulovat) do jednoho modulu.

Navržené rozdělení je následující:

- hlavní jednotka (právě 1),
- startovací modul (nejvýše 1),
- cílový modul (alespoň 1),
- zobrazovací moduly (volitelně).

#### 4.3.1 Topologie

Každá sestava časomíry bude mít hlavní jednotku. Díky tomu se nám nabízí možnost uspořádat komunikující moduly do hvězdicové topologie, kde středem bude právě hlavní jednotka.

Ustavení sítě bude proto jednoduché. Každý modul se bude snažit připojit pouze k hlavní jednotce. Nebude muset vyhledávat další moduly, jejichž počet je variabilní.

Vzdálenost, na kterou zařízení komunikují, musí spolu s volbou bezdrátových modulů umožnit přímou komunikaci bez použití opakovačů (repeater) a jim podobných zařízení (range extender).

### 4.3.2 Hlavní jednotka

V sestavě časomíry je právě jedna hlavní jednotka. Slouží jako přístupový bod a je středem veškerého toku dat. Proto musí být v dosahu všech ostatních modulů. Obvykle bývá umístěna blízko startu. Řídí synchronizaci hodin mezi moduly (bude popsáno dále), zahajuje ji. Před započítím dalšího pokusu zřetelně signalizuje připravenost časomíry jako celku, která je podmíněna např. vynulováním časů, synchronizovanými hodinami, apod.

Obsluhují ji časoměřiči, kteří se starají o zápis časů a jejich vyhodnocení. Je vybavena ovládacími tlačítky a LCD displejem, na kterém jsou zobrazovány dosažené časy v jednotlivých drahách.

### 4.3.3 Jakýkoliv modul kromě hlavní jednotky

Ihned po zapnutí navazuje komunikaci s hlavní jednotkou. Pokud má v paměti nějaká uložená data, tak se je snaží odeslat hlavní jednotce. Podporuje synchronizaci hodin, které se věnuje s maximální prioritou. Jeho konfigurace je možná prostřednictvím hlavní jednotky.

### 4.3.4 Startovací modul

V sestavě časomíry je nejvýše jeden startovací modul. Zajišťuje bezdrátovou komunikaci mezi senzory u startu a hlavní jednotkou. Umožňuje připojit startovací zařízení – obvykle pistolí s vestavěným spínačem. Volitelně je k ní možné připojit optickou bránu, která bude využita pro hlídání předčasného startu, nebo pro speciální způsob startování.

Na příkaz nového měření (od hlavní jednotky) odpovídá, jestli je připraven (připojené senzory jsou v klidu, paměť časů musí být prázdná). Následně čeká na aktivaci startovacího senzoru. Pokud dojde ke 2. aktivaci startovacího senzoru (2 výstřely z pistole znamenají neplatný start), nebo aktivaci volitelně instalované optické brány pro hlídání předčasného startu, tak přidá informaci o neplatném startu.

Čas odstartování a případné informace o neplatném startu si nejprve ukládá do paměti (která se nevymaže při ztrátě napájení), a teprve poté se vše snaží odeslat hlavní jednotce. Data z paměti maže až po obdržení potvrzení o přijetí, případně při vynuceném nulování.

Prostřednictvím hlavní jednotky je možno konfigurovat typ startovacího senzoru (optická brána, nebo spínač – spínací, rozpínací, přepínací) a parametry pro detekci předčasného startu (prodlevu).

### 4.3.5 Cílové moduly

V sestavě časomíry je alespoň jeden cílový modul. Umožňuje připojit různá koncová čidla (spínací, rozpínací, přepínací, nebo optickou bránu) a může signalizovat aktivaci koncového čidla (např. pomocí relé, nebo LED diod). Teoreticky mohou být měřeny až 4 dráhy současně a to pomocí jediného modulu se 4 připojenými senzory, nebo až 4 moduly – každý s jediným připojeným senzorem.

Na příkaz nového měření (od hlavní jednotky) odpovídá, jestli je připraven (připojené senzory jsou v klidu, paměť časů musí být prázdná). Následně čeká na aktivaci sensorů. Časy aktivace sensorů si průběžně ukládá do paměti (která se nevymaže při ztrátě napájení), a snaží se vše odeslat hlavní jednotce. Data z paměti maže až po obdržení potvrzení o přijetí, případně při vynuceném nulování.

Každý vstup pro senzory cílového modulu může být doplněn o LED diodu, která bude signalizovat jeho stav. Tato signalizace je funkční, i pokud modul není spojen s hlavní

jednotkou. Při použití přepínacích senzorů signalizuje LED i chybové stavy, které jsou shrnuty v tabulce 4.2. Tuto LED signalizaci lze využít i pro senzor startovacího modulu. Výběr barev není náhodný, ale má svůj systém. Pokud se při signalizaci vyskytuje červená barva, znamená to chybu. Navržených barev svitu je dosaženo dvoubarevnou LED složenou ze zelené a červené. Rozsvícením červené a zelené části zároveň získáme oranžový odstín.

Stav senzoru	Detekována chyba	Barva svitu LED
nepoužit (SW deaktivován)	nelze	žádná (nesvítí)
v klidu	ne	<b>zelená</b>
v klidu	ano	<b>červená</b>
aktivován	ne	<b>oranžová</b>
aktivován	ano	<b>střídavě bliká oranžová a červená</b>

Tabulka 4.2: LED signalizace stavů senzorů

Prostřednictvím hlavní jednotky je možno konfigurovat počet a typ připojených senzorů (optická brána, nebo spínač – spínací, rozpínací, přepínací) – pro každý vstup zvlášť. Pokud je možné připojit externí signalizaci aktivace senzoru (např. světlo spínané pomocí relé), tak se také konfiguruje styl signalizace:

- Žádná signalizace.
- Sepnout na N sekund.
- Sepnout, počkat na aktivaci všech používaných senzorů a poté ještě počkat N sekund.
- Sepnout trvale – až do nulování.

#### 4.3.6 Zobrazovací moduly

V sestavě časomíry může být různý počet zobrazovacích modulů. Pro účely tréninku nemusí být nainstalován žádný (výsledný čas bude zobrazen pouze na hlavní jednotce). Na rozsáhlejších soutěžích může být větší počet zobrazovacích panelů – např. pro každou dráhu jeden.

Zobrazovací modul bude nejčastěji vestavěn přímo do zobrazovacího panelu. Zobrazované informace se napříč soutěžemi a disciplínami liší natolik, že je nelze předem specifikovat. Je například možné použít pro měření 4 drah pouze jediný panel, na kterém se budou naměřené časy střídát. Variant je velké množství.

Kromě měření času pokusu mohou být zobrazovány průběžné výsledky, odpočet času na přípravu pokusu, název soutěžícího (nebo družstva), hodiny, nebo teplota vzduchu. Společnou vlastností by mohla být možnost regulace jasu (řízeno z hlavní jednotky).

#### Platnost zobrazených dat

Při bezdrátové komunikaci může dojít ke ztrátě dat, což by mohlo vést k nesprávným výsledkům zobrazeným prostřednictvím tohoto modulu.

Při měření času pokusu obdrží tyto moduly čas odstartování pokusu. Protože jsou jejich hodiny synchronizovány s hlavní jednotkou, tak je možné spočítat uplynulou dobu od startu a tento čas průběžně zobrazovat. Pokud by ale došlo ke ztrátě času o ukončení pokusu, tak zobrazovací modul bude dále čítat. Tato situace nebude mít vliv na výsledný čas (cílový

modul opakovaně zasílá čas hlavní jednotce, dokud mu nepotvrdí přijetí), ale může to zmást jak diváky, tak závodníky.

Řešením je pravidelné zasílání speciálních zpráv, které informují o tom, že veškerá komunikace probíhá správně a nejsou žádná nedoručená data. Pokud zobrazovací modul neobdrží tuto zprávu, tak pouze zhasne displej, aby nebyly vidět neaktuální (chybné) informace. Více bude popsáno u návrhu komunikačního protokolu.



## Kapitola 5

# Synchronizace hodin mezi jednotlivými moduly

U bezdrátové komunikace nelze předpokládat 100% spolehlivost doručení dat. Mohou nastat kolize v síti, chyba při přenosu, nebo dočasné rušení. Pokud bychom přenášeli pouze informace o změnách stavů senzorů, tak nám měřený čas mohou znehodnotit dva problémy – možnost ztráty dat, nebo nedeterministické zpoždění.

Tento způsob přenosu využívají např. bezdrátové zvonky. Jedná se o nespolehlivé řešení a velmi pravděpodobně bude výsledný čas nepřesný. Proto budou místo změn stavů senzorů přenášeny časy těchto událostí. Zařízení se budou pokoušet doručit data tak dlouho, dokud nepřijde potvrzení – tím jsme odstranili oba problémy. Vznikl ale nový problém – všechna zařízení musí být udržována v synchronním stavu, tzn. musí mít k dispozici v každý okamžik stejné časové razítko.

Po zapnutí modulu se bude čas počítat od 0 s. Maximální hodnota času (resp. velikost datového typu, v níž bude uložen) musí být tak velká, aby umožnila provoz časoměry na soutěži bez přetečení počítadla. Případně musí být časomíra schopna se správně vyrovnat s přetečením počítadla času.

### 5.1 Přesnost měření času

Požadovaná přesnost měření je 0,01 s, což je také nejmenší rozlišovací jednotka. Pokud by se nám podařilo všechny moduly zapnout přesně ve stejnou chvíli (s přesností na 0,01 s), tak je nutné zjistit, za jakou dobu se začnou časy mezi moduly lišit – vlivem tolerancí krystalů, které jsou používány jako zdroj kmitů pro mikrokontrolér.

Přesnost krystalu určuje, o kolik se může lišit skutečná frekvence od udávané (za předepsaných podmínek). Její jednotkou je obvykle ppm (parts per million), což je jedna miliontina. Jedná se o podobnou jednotku jako procento (jedna setina) a promile (jedna tisícina). Krystaly dostupné na trhu mají přesnost přibližně v rozmezí 10–100 ppm.

Při určování nejhorší toleranční chyby budeme předpokládat, že jeden modul se odchyluje směrem nahoru a druhý dolů. Vznikne tak možná chyba až dvojnásobku přesnosti krystalu. Nyní spočítáme pomocí vzorce 5.1, za jakou dobu se začnou časy mezi moduly lišit o rozlišovací jednotku.

$$t_{odchylka} = 2 \cdot presnost \cdot \Delta t_{doba}$$
$$\Delta t_{doba} = \frac{t_{odchylka}}{2 \cdot presnost} \tag{5.1}$$

$t_{odchylka}$  je maximální odchylka, kterou si stanovíme (zde 0,01 s). *presnost* je přesnost krystalu vyjádřená bez jakékoliv jednotky. Výsledkem je doba ( $\Delta t_{doba}$ ), za kterou bude překročena stanovená odchylka.

Pokud bychom měli krystal s přesností 20 ppm (což odpovídá poměrně kvalitnímu krystalu), tak k překročení povolené odchylky v čase dojde za:

$$\Delta t_{doba} = \frac{0,01}{2 \cdot 20 \cdot 10^{-6}} = 250 \text{ s}$$

## 5.2 Možnosti synchronizace hodin

Dalo se předpokládat, že k odchylce hodin dojde v relativně krátké době. Synchronizaci hodin jednotlivých modulů bude nutné provádět i v průběhu soutěže (může se stát, že i v průběhu samotného měřeného pokusu). Proto je potřeba najít způsob synchronizace hodin, který bude mít požadovanou přesnost (alespoň 0,01 s). Možností je několik a postupně si je proto rozebereme.

### 5.2.1 GPS

GPS přijímače mají výstup signálu 1PPS (1 pulse per second). Tento výstup vytvoří každou sekundu krátký impuls, kterým můžeme synchronizovat hodiny modulů časoměry. Chyba 1PPS signálu se pohybuje v desítkách nanosekund [18] [24], což je pro naše potřeby více než dostatečné.

Signál 1PPS s sebou nenese žádné další informace, takže neumožní sjednotit čas mezi moduly, ale pouze srovná rozdíl do velikosti 1 s. Vzniklý nedostatek by šel řešit vzájemnou komunikací modulů mezi sebou, protože interval 1 s je dostatečně velký, aby se všechna data stihla doručit a potvrdit.

Hlavním problémem je nutnost být v dosahu GPS signálu. Některé soutěže probíhají ve sportovních halách, kde bude GPS signál nedostupný. Navíc jsou GPS přijímače poměrně drahé. Ne každý z nich disponuje výstupem 1PPS, což nám zužuje výběr. Celkový dopad na cenu zařízení by byl velký, protože každý modul časoměry by musel být vybaven GPS přijímačem.

Použití GPS tedy není pro bezdrátovou časoměru vhodné zejména kvůli ceně a dostupnosti GPS signálu v uzavřených budovách.

V následujících podkapitolách se budu zabývat synchronizačními metodami, které nepotřebují speciální hardware. Bude se jednat o algoritmy, které využívají stávající bezdrátovou komunikaci.

Při synchronizaci pomocí bezdrátové komunikace může přesnost negativně ovlivnit:

- zpoždění síťového zařízení (fronty, přístup k médiu, výpočet kontrolního součtu, šifrování),
- samotný přenos (šíření) dat,
- latence software (operační systém, obsluha přerušení).

Při komunikaci na krátké vzdálenosti (což 100 m je) můžeme zpoždění při přenosu (šíření) dat ignorovat.

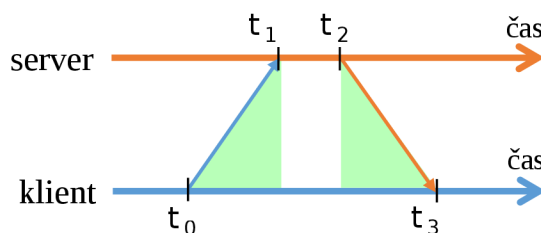
## 5.2.2 Network Time Protocol

Network time protocol je jeden z nejstarších protokolů pro synchronizaci hodin. Je hodně známý a rozšířený. Nejaktuálnější verze NTPv4 [9] může dosahovat (za určitých podmínek) přesnosti synchronizace v desítkách mikrosekund.

Synchronizace je možná díky výměně několika zpráv po síti a přesném měření časů událostí, které při komunikaci nastaly.

Princip (algoritmus) výměny zpráv je znázorněn na obrázku 5.1. Synchronizaci iniciuje klient a má tyto kroky:

1. Klient si uloží čas ( $t_0$ ).
2. Klient odešle zprávu (požadavek ke zjištění zpoždění) NTP serveru.
3. Server si uloží čas přijetí požadavku ( $t_1$ ).
4. Server připraví zprávu (odpověď), do které připojí čas  $t_1$  a  $t_2$ , což je jeho aktuální čas.
5. Server připravenou zprávu odešle.
6. Klient si uloží čas přijetí odpovědi ( $t_3$ ).



Obrázek 5.1: Znázornění NTP synchronizačního algoritmu

Z časů  $t_0$  až  $t_3$  je možné pomocí vzorce 5.2 spočítat celkové zpoždění  $\delta$ , které nastalo při komunikaci (zeleně zvýrazněné trojúhelníky na obrázku 5.1).

$$\delta = (t_3 - t_0) - (t_2 - t_1) \quad (5.2)$$

Při výpočtu offsetu  $\theta$  (vzorec 5.3) času klienta oproti času serveru se předpokládá, že zpoždění při komunikaci směrem k serveru je stejné, jako směrem ke klientovi. Vzorec pro výpočet offsetu byl odvozen následovně:

$$\begin{aligned} \theta &= t_1 - t_0 - \frac{\delta}{2} \\ \theta &= t_1 - t_0 - \frac{(t_3 - t_0) - (t_2 - t_1)}{2} \\ \theta &= \frac{2 \cdot t_1 - 2 \cdot t_0 - [(t_3 - t_0) - (t_2 - t_1)]}{2} \\ \theta &= \frac{2 \cdot t_1 - 2 \cdot t_0 - t_3 + t_0 + t_2 - t_1}{2} \\ \theta &= \frac{t_1 - t_0 - t_3 + t_2}{2} \end{aligned}$$

$$\theta = \frac{(t_1 - t_0) + (t_2 - t_3)}{2} \quad (5.3)$$

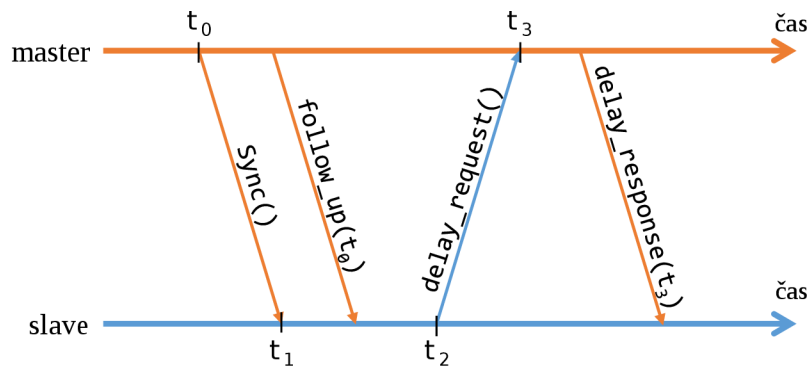
Celý proces výměny zpráv a výpočtu offsetu je několikrát opakován, aby bylo možné omezit nedeterministické chyby. NTP popisuje i filtrování a výběr hodnot. Teprve potom je upraven čas klienta podle vybraného offsetu.

Tento algoritmus odstranil některé chyby vzniklé zpožděním síťového zařízení (např. výpočet kontrolního součtu, šifrování). Pořád ale zbývá chyba vzniklá přístupem k médiu, čekáním dat ve frontách a nestálou latencí software.

### 5.2.3 Precision Time Protocol

Precision time protocol je definován standardem IEEE 1588-2008 [2]. Byl vytvořen, protože pro některé účely už NTP nestačil. Udávaná přesnost synchronizace je méně než  $1 \mu\text{s}$ . S NTP má spoustu společných částí, zejména výpočet zpoždění (vzorec 5.2) a offsetu (vzorec 5.3). Liší se ale v komunikaci, která je znázorněna na obrázku 5.2. Inicjuje ji server (master) a má následující kroky:

1. PTP server periodicky vysílá `sync` zprávy. Čas odeslání je obsažen buď v `sync` zprávě, nebo je odeslán zvlášť ve zprávě `follow_up`. Obě zprávy (`sync` i `follow_up`) jsou odeslány pomocí broadcastu, nebo multicastu.
2. V případě, že má klient zájem o synchronizaci, tak si uloží čas doručení `sync` zprávy ( $t_1$ ) a vyextrahuje čas jejího odeslání ( $t_0$ ).
3. Dále klient vytvoří `delay_request` zprávu a uloží si čas jejího odeslání ( $t_2$ ).
4. Server si uloží čas přijetí `delay_request` ( $t_3$ ) a odešle ho klientovi ve zprávě `delay_response`.



Obrázek 5.2: Znázornění PTP synchronizačního algoritmu

Celý proces se může opakovat, aby si mohl klient vybrat nejlepší data. Udávaná vysoká přesnost synchronizace je zajištěna díky hardwarové podpoře při tvorbě časů. Při odesílání i přijímání zpráv vytváří časy  $t_0$  až  $t_3$  síťové rozhraní, takže se úplně eliminovala chyba vzniklá softwarem (latence operačního systému, obsluha přerušení). Navíc PTP definuje síťové prvky (routery, switche), které nezpůsobí chybu synchronizace při čekání ve frontě.

### 5.2.4 Reference Broadcast Synchronization

Reference broadcast synchronization [2] je od NTP a PTP poměrně odlišný postup pro synchronizaci hodin. Přesnost záleží opět na hardwarové podpoře vytváření časových razítek a může dosahovat i několika mikrosekund.

Pokud chceme pomocí RBS synchronizovat  $N$  zařízení, tak potřebujeme celkem  $N + 1$  zařízení (o jedno navíc). Zařízení, které je navíc nazveme řídicím zařízením.

Princip je velmi jednoduchý:

1. Řídicí zařízení odešle referenční synchronizační zprávu broadcastem.
2. Jednotlivá klientská zařízení si uloží čas přijetí referenční synchronizační zprávy.
3. Klientská zařízení si mezi sebou vymění informace o naměřených časech, a dohodnou se na jejich sjednocení (synchronizaci).

Z popsaného principu vyplývá první nedostatek – řídicí zařízení nebude synchronizováno. U bezdrátové časomíry bohužel nemáme žádný modul, který by mohl celou dobu zastávat funkci řídicí jednotky – všechny moduly musí být synchronizovány. Proto by synchronizace musela proběhnout ve dvou fázích – při druhé musí funkci řídicího zařízení zastávat některý z již synchronizovaných modulů.

Dále je potřeba stanovit, jakým způsobem se zařízení dohodnou na sjednocení časů. Při větším počtu klientských zařízení je vše složitější. Pokud navážu na předchozí odstavec, tak při druhé fázi synchronizace původní řídicí zařízení nesmí vysílat svůj čas (protože je jediný nesynchronizovaný), ale pouze přijímat časy ostatních modulů.

Nejmenší možný počet zařízení jsou 3 (jedno řídicí, 2 klientské). To by znemožnilo použití minimální sestavy časomíry s jedním cílovým modulem a hlavní jednotkou.

Výhodou tohoto algoritmu je úplné odstranění chyby odesílání dat (čekání ve frontě, přístup k médiu). Ale kvůli zmíněným nevýhodám je pro bezdrátovou časomíru nevyhovující.

### 5.2.5 Simple Network Time Protocol

Simple network time protocol je definován v [8]. Jeho přesnost je za určitých podmínek podobná jako u NTP, v běžných počítačových sítích se může zhoršit až na stovky milisekund.

Komunikace je stejná jako u NTP a to včetně výpočtu zpoždění (vzorec 5.2) a offsetu (vzorec 5.3). SNTP ale neřeší možné zpoždění na síťových prvcích, ani nefiltruje hodnoty, které se výrazně liší od ostatních. Nemá ani hardwarovou podporu při tvorbě času.

### 5.2.6 Výsledná volba

Při tvorbě časových razítek jsem se inspiroval protokolem PTP, který definuje hardwarovou podporu pro jejich tvorbu. Bezdrátový modul ihned po přijetí zprávy vygeneruje přerušení do mikrokontroléru, kde bude ve velmi krátké době obslouženo, přičemž se uloží čas události. Nejedná se sice o přímou hardwarovou podporu tvorby časového razítka, ale výsledek bude v důsledku vysoké priority při obsluze přerušení podobný. Bezdrátová časomíra nepoužívá switche, routery ani jiné podobné síťové prvky, které by mohly pakety náhodně pozdržet. Proto není třeba využívat vlastností PTP, které toto zpoždění eliminují. Další specifické vlastnosti PTP nejsou třeba, proto jsou ostatní postupy (výpočty zpoždění a offsetu, komunikace) přežaty z jednoduchého SNTP.

Jelikož mohou být moduly bezdrátové časomíry v režimu nízké spotřeby, tak je třeba modifikovat komunikační protokol pro synchronizaci. K přijetí zprávy může dojít až při periodickém dotazování zařízení, což je zdrojem nedeterministického zpoždění. Proto bude synchronizaci podle SNTP předcházet speciální zpráva, která na určitou dobu deaktivuje režim nízké spotřeby. Více bude popsáno v podkapitole věnující se komunikačnímu protokolu bezdrátové časomíry.

## Kapitola 6

# Návrh bezdrátové komunikace

### 6.1 Volba frekvence

Pro bezdrátovou komunikaci je nutné zvolit vhodný kmitočet. Využívání vymezených kmitočtů stanovuje Český telekomunikační úřad ve všeobecném oprávnění [25]. Ten taky zpřístupnil přehled kmitočtů na své webové aplikaci „Využití rádiového spektra“ [26].

Z možných kmitočtových pásem lze použít 433 MHz, 868 MHz, nebo 2,4 GHz. Pásmo 2,4 GHz je intenzivně využíváno pro bezdrátové připojení k internetu – a to poskytovateli připojení i samotnými domácnostmi (domácí WiFi routery). Pásmo 433 MHz je využíváno bezdrátovými zvonky a hračkami, jejichž vysílače jsou často velmi laciného provedení a způsobují proto velké rušení. Vhodnou volbou tedy bude kmitočtové pásmo 868 MHz, na kterém lze provozovat zařízení krátkého dosahu (SRD) s vyzařovaným výkonem do 25 mW. Toto pásmo je ČTÚ rozděleno na několik menších částí, které jsou všeobecným oprávněním různě omezeny, zejména klíčovací poměrem. Jako alternativu ke klíčovacího poměru lze použít metodu Listen Before Talk (bude popsáno dále).

#### 6.1.1 Klíčovací poměr

Klíčovací poměr (známý též jako `duty cycle`, DC) je definován jako podíl času, kdy zařízení aktivně vysílá v rámci jakékoliv jedné hodiny. V kmitočtovém pásmu 863–870 MHz je určen  $DC \leq 0,1 \%$ . Pro pásmo 868,0–868,6 (což jsou jen některé kanály) je  $DC \leq 1,0 \%$ , což odpovídá době 36 s, po kterou je možné vysílat v rámci jedné hodiny.

Bezdrátová časomíra vybavená maximálním počtem modulů však generuje značný síťový provoz. Aby byl s takovým množstvím zpráv dodržen DC, tak by bylo nutné nastavit baudrate na poměrně vysokou hodnotu, kterou bezdrátový modul nemusí podporovat, nebo při níž bude komunikace nestabilní. Proto je toto omezení nutné řešit implementací Listen Before Talk.

#### 6.1.2 Listen before talk

Je metoda vysílání, při které je nejprve určitou dobu poslouchána komunikace na vybraném kanálu. Pokud nepřesáhne úroveň signálu hraniční (prahovou) hodnotu, tak je možné vysílat.

ČTÚ ve svých dokumentech uvádí LBT jako metodu vysílání pouze po vyžádání na základě příjmu. Může to znamenat, že zařízení, které odpovídá na zprávu, nemusí sledovat, zda je pásmo volné, a může rovnou začít vysílat.

Je výhodné, aby tuto funkci bezdrátový modul alespoň částečně hardwarově podporoval, protože jeho obsluha v mikrokontroléru by ho zbytečně zatěžovala a zvyšovala by celkovou spotřebu zařízení.

## 6.2 Komunikační protokol

V této části se budu věnovat návrhu síťového komunikačního protokolu na aplikační vrstvě.

### 6.2.1 Společná část – MessageType

Jednotlivé zprávy je nutné od sebe odlišit. Každá z nich má totiž jiný význam, ale hlavně jinou délku a strukturu, podle které jsou v ní uloženy informace. Typ zprávy je vždy uložen na začátku zprávy, jeho velikost je 8 bitů (`uint8_t`). Sémanticky jde o číslo, které v kódu odpovídá položce výčtového typu. Toto číslování nemusí být nutně sekvenční, je pouze důležité, aby se pro 2 různé zprávy nepoužilo 1 číslo. Pokud je zpráva dále rozdělena na požadavek a odpověď, tak bude používat 2 různé čísla typu zprávy.

Následující nadpisy ponесou anglický název zprávy, jejíž význam bude popsán uvnitř každé podkapitoly. Každá zpráva se může ještě dělit na požadavek a odpověď na něj. Pokud jsou se zprávou odesílány další data, tak jsou přehledně uvedeny v tabulce.

Zprávy jsou odesílány po celých bajtech. V případě, že velikost zprávy není celý byte, tak je vhodně doplněna o prázdné bity, aby bylo dosaženo celkové velikosti v celých bytech.

### 6.2.2 GetDeviceInformation

Zpráva `GetDeviceInformation` slouží k získání informací o koncovém zařízení, které jsou důležité zejména pro hlavní jednotku. Zpráva je odesílána např. když se do sítě připojí nové zařízení, a je ho třeba identifikovat.

#### Požadavek

Odesílá obvykle hlavní jednotka ostatním modulům (vždy pouze jednomu). Neobsahuje další parametry.

#### Odpověď

Dotázaný modul časomíry odesílá odpověď hlavní jednotce.

<b>DeviceType</b> [2 bits]
00: Hlavní jednotka
01: Cílový modul
10: Startovací modul
11: Zobrazovací modul

### 6.2.3 FinishModule\_GetSensorsCfg

Zpráva `FinishModule_GetSensorsCfg` slouží k získání aktuálního nastavení čidel (senzorů) jednotlivých vstupů cílového modulu. K cílovému modulu lze připojit různý počet sen-



zorů s různým chováním (spínací, rozpínací, přepínací). Tato zpráva se používá spolu s `FinishModule_SetSensorsCfg` ke konfiguraci počtu a chování senzorů cílového modulu.

### Požadavek

Požadavek odesílá pouze hlavní jednotka cílovým modulům (vždy pouze jednomu). Neobsahuje další parametry.

### Odpověď

Dotázaný cílový modul časoměry odesílá odpověď hlavní jednotce. Délka odpovědi je variabilní podle počtu vstupů pro senzory u hlavní jednotky, což je dáno hardwarovými vlastnostmi. Počet vstupů pro senzory je v prvních 2 bitech zprávy (`NumberOfSensors`), celková délka je  $2 + 3 \cdot n$  bitů, kde  $n$  je počet vstupů pro senzory.

<b>NumberOfSensors</b> [2 bits]	<b>S1_Enabled</b> [1 bit]	<b>S1_Type</b> [2 bits]	...	<b>Sn_Enabled</b> [1 bit]	<b>Sn_Type</b> [2 bits]
00: 1 senzor 01: 2 senzory 10: 3 senzory 11: 4 senzory	0: Disabled 1: Enabled	00: Spínací 01: Rozpínací 10: Přepínací		0: Disabled 1: Enabled	00: Spínací 01: Rozpínací 10: Přepínací

Každý vstup pro senzory může být povolen, nebo zakázán pomocí `Sn_Enabled`, chování senzoru určuje `Sn_Type`.

### 6.2.4 FinishModule\_SetSensorsCfg

Zpráva `FinishModule_SetSensorsCfg` slouží k nastavení čidel (senzorů) jednotlivých vstupů cílového modulu. K cílovému modulu lze připojit různý počet senzorů s různým chováním (spínací, rozpínací, přepínací). Tato zpráva se používá spolu s `FinishModule_GetSensorsCfg` ke konfiguraci počtu a chování senzorů cílového modulu.

### Požadavek

Požadavek odesílá pouze hlavní jednotka cílovým modulům (vždy pouze jednomu). Narozdíl od zprávy `FinishModule_GetSensorsCfg` se zde nemusí uvádět počet senzorů, neboť to cílový modul (příjemce zprávy) ví – je to jeho hardwarová vlastnost.

<b>S1_Enabled</b> [1 bit]	<b>S1_Type</b> [2 bits]	...	<b>Sn_Enabled</b> [1 bit]	<b>Sn_Type</b> [2 bits]
0: Disabled 1: Enabled	00: Spínací 01: Rozpínací 10: Přepínací		0: Disabled 1: Enabled	00: Spínací 01: Rozpínací 10: Přepínací

### Odpověď

Dotázaný cílový modul časoměry aplikuje přijaté nastavení a odešle potvrzení o přijetí (ACK). Neobsahuje další parametry.

### 6.2.5 FinishModule\_GetSignalizationCfg

Zpráva `FinishModule_GetSignalizationCfg` slouží k získání aktuálního nastavení signalizace aktivace čidel (senzorů) jednotlivých vstupů cílového modulu. Nastavení je jednotné pro všechny čidla, ale signalizace bude aktivní pouze pro čidla, která jsou povolena. Tato zpráva se používá spolu s `FinishModule_SetSignalizationCfg` k nastavení signalizace aktivace čidel.

#### Požadavek

Požadavek odesílá pouze hlavní jednotka cílovým modulům (vždy pouze jednomu). Neobsahuje další parametry.

#### Odpověď

Dotázaný cílový modul časoměry odesílá odpověď hlavní jednotce.

Style [2 bits]	Interval [6 bits]
00: Vypnuto	
01: Styl 1	
10: Styl 2	
11: Styl 3	

`Style` určuje styl signalizace a je možné vybrat z následujících možností:

- **Vypnuto:** Žádná signalizace.
- **Styl 1:** Sepnout na N sekund.
- **Styl 2:** Sepnout. Jakmile dojde k aktivaci ostatních používaných čidel, tak počkat N sekund a rozepnout.
- **Styl 3:** Sepnout trvale (až do příkazu nulování).

`Interval` Je parametr některých stylů signalizace a vyjadřuje počet sekund přímým kódem bez znaménka. Pokud styl signalizace nevyžaduje žádné parametry, tak na hodnotě tohoto parametru nezáleží. Je však vhodné jeho hodnotu zachovávat pro případ přechodu na jiný typ signalizace.

### 6.2.6 FinishModule\_SetSignalizationCfg

Zpráva `FinishModule_SetSignalizationCfg` slouží k nastavení signalizace aktivace čidel (senzorů) jednotlivých vstupů cílového modulu. Nastavení je jednotné pro všechny čidla, ale signalizace bude aktivní pouze pro čidla, která jsou povolena. Tato zpráva se používá spolu s `FinishModule_GetSignalizationCfg` k nastavení signalizace aktivace čidel.

#### Požadavek

Požadavek odesílá pouze hlavní jednotka cílovým modulům (vždy pouze jednomu). Parametry `Style` a `Interval` jsou stejné jako ve zprávě `FinishModule_GetSignalizationCfg`.

<b>Style</b> [2 bits]	<b>Interval</b> [6 bits]
00: Vypnuto 01: Styl 1 10: Styl 2 11: Styl 3	

### Odpověď

Dotázaný cílový modul časoměry aplikuje přijaté nastavení a odešle potvrzení o přijetí (ACK). Neobsahuje další parametry.

### 6.2.7 FinishModule\_SendSensorsData

Zpráva `FinishModule_SendSensorsData` slouží k odeslání informací o aktivaci senzoru cílového modulu. Rychlost doručení zprávy neovlivní přesnost měření, protože kromě samotné události je odeslán i čas, kdy k ní došlo. Zpráva odesílá informaci pouze o jediném senzoru. V případě měření několika drah bude těchto zpráv odesláno více (pro každý senzor zvlášť).

### Požadavek

Zprávu odesílá pouze cílový modul hlavní jednotce. Čas, kdy došlo k aktivaci senzoru `Sensor_number` je vyjádřen parametry `Time_s` (celé vteřiny) a `Time_centiseconds` (desítky milisekund). Při zjištění poruchy je toto signalizováno příznakem `Fault`.

<b>Sensor_number</b> [2 bits]	<b>Time_s</b> [16 bits]	<b>Time_centiseconds</b> [7 bits]	<b>Fault</b> [1 bit]
00: Vstup (čidlo) 1 01: Vstup (čidlo) 2 10: Vstup (čidlo) 3 11: Vstup (čidlo) 4			0: OK 1: Porucha

### Odpověď

Hlavní jednotka si informace uloží a potvrdí přijetí odesláním ACK. Zprávan neobsahuje další parametry.

### 6.2.8 Reset\_NewMeasurement

Zpráva `Reset_NewMeasurement` slouží k nulování časoměry (jednotlivých modulů) a přípravě na nové měření.

### Požadavek

Požadavek může odeslat pouze hlavní jednotka. Jediným parametrem je `ForceReset`, který vynutí nulování i přesto, že probíhá měření, nebo jsou nedeslaná data v některém zařízení časoměry. Zpracovat jej dokážou všechny ostatní moduly, přičemž každý se může zachovat jinak.

<b>ForceReset</b> [1 bit]
0: Běžný reset
1: Vynucený reset

## Odpověď

Dotázaný modul časomíry odesílá odpověď hlavní jednotce. Každý modul časomíry může odeslat zprávu s odlišným významem, protože u různých modulů mohou nastat různé chyby. Společný význam má hodnota 0, která znamená, že vše proběhlo správně. **ModuleSpecific** je část zprávy, která bude definována pro každý typ modulu časomíry zvlášť. Celou zprávu lze považovat za 16bitové číslo reprezentující chybový kód.

<b>ModuleSpecific</b> [8 bits]	<b>General</b> [8 bits]
0: OK	0: OK
	1: Probíhá měření - nelze provést nulování.

**Startovací moduly** vymažou ze své paměti poslední uložený čas. **Cílové moduly** rozeznou signalizaci aktivace koncového čidla. **Zobrazovací moduly** vynulují časy na displejích.

<b>ModuleSpecific - startovací modul</b> [8 bits]
1-2 lze kombinovat (OR).
1: Startovací čidlo není v klidovém stavu.
2: Čidlo předčasného startu není v klidovém stavu.

<b>ModuleSpecific - cílový modul</b> [8 bits]
1-128 lze kombinovat (OR).
1: Vstup 1 (čidlo 1) má poruchu.
2: Vstup 1 (čidlo 1) není v klidovém stavu.
4: Vstup 2 (čidlo 2) má poruchu.
8: Vstup 2 (čidlo 2) není v klidovém stavu.
16: Vstup 3 (čidlo 3) má poruchu.
32: Vstup 3 (čidlo 3) není v klidovém stavu.
64: Vstup 4 (čidlo 4) má poruchu.
128: Vstup 4 (čidlo 4) není v klidovém stavu.

### 6.2.9 StartModule\_GetSensorCfg

Zpráva **StartModule\_GetSensorCfg** slouží k získání aktuálního nastavení startovacího čidla (senzoru) a používá se spolu s **StartModule\_SetSensorCfg** ke konfiguraci startovacího čidla připojeného ke startovacímu modulu.

## Požadavek

Požadavek odesílá pouze hlavní jednotka startovacímu modulu. Neobsahuje další parametry.

## Odpověď

Dotázaný startovací modul časoměry odesílá odpověď hlavní jednotce, ve které je aktuální nastavení chování startovacího senzoru.

<b>Type</b> [2 bits]
00: Spínací
01: Rozpínací
10: Přepínací

### 6.2.10 StartModule\_SetSensorCfg

Zpráva `StartModule_SetSensorCfg` slouží k nastavení startovacího čidla (senzoru) a používá se spolu s `StartModule_GetSensorCfg` ke konfiguraci startovacího čidla připojeného ke startovacímu modulu.

## Požadavek

Požadavek odesílá pouze hlavní jednotka startovacímu modulu. Jediným parametrem je chování startovacího senzoru (`Type`).

<b>Type</b> [2 bits]
00: Spínací
01: Rozpínací
10: Přepínací

## Odpověď

Dotázaný startovací modul časoměry aplikuje přijaté nastavení a odešle potvrzení o přijetí (ACK). Neobsahuje další parametry.

### 6.2.11 StartModule\_SendStartData

Zpráva `StartModule_SendStartData` slouží k odeslání informací o aktivaci senzoru cílového modulu. Rychlost doručení zprávy neovlivní přesnost měření, protože kromě samotné události je odeslán i čas, kdy k ní došlo.

## Požadavek

Zprávu odesílá pouze startovací modul hlavní jednotce. Čas, kdy došlo k aktivaci startovacího senzoru je vyjádřen parametry `Time_s` (celé vteřiny) a `Time_centiseconds` (desítky milisekund). Při zjištění poruchy je toto signalizováno příznakem `Fault`. Pokud dojde v průběhu pokusu k další aktivaci startovacího senzoru (např. druhý výstřel z pistole), znamená to neplatný start, což je signalizováno příznakem `InvalidStart`.

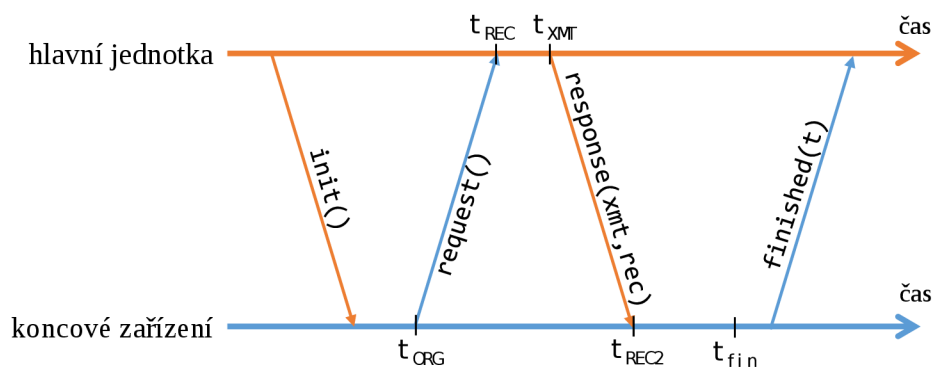
<b>Time_s</b> [16 bits]	<b>Time_centiseconds</b> [7 bits]	<b>Fault</b> [1 bit]	<b>InvalidStart</b> [1 bit]
		0: OK 1: Porucha	0: OK 1: Neplatný start

## Odpověď

Hlavní jednotka si informace uloží a potvrdí přijetí odesláním ACK. Zpráva neobsahuje další parametry.

### 6.2.12 Synchronizace – několik zpráv

Synchronizace proběhne v několika po sobě následujících krocích (znázorněno na obrázku 6.1). Inicjuje ji hlavní jednotka, která zároveň dohlíží na platnost synchronizace a případně si vyžádá opětovné spuštění synchronizačního procesu.



Obrázek 6.1: Průběh výměny zpráv při synchronizaci

#### Krok 1: TimeSync\_Init

Zprávu odesílá hlavní jednotka konkrétnímu zařízení. Po odeslání tohoto příkazu nebude hlavní jednotka zpracovávat (přijímat) žádné zprávy, kromě těch, které se týkají synchronizace. Je to opatření pro zajištění co nejrychlejší odezvy při synchronizaci pro zajištění její dostatečné přesnosti.

Pokud některý modul obdrží tuto zprávu, tak musí zůstat na příjmu, dokud nebude synchronizace dokončena – nemůže se přepínat do režimu nízké spotřeby a zprávy přijímat ve velkých intervalech, což by způsobilo nepřesnou synchronizaci. Modul v průběhu synchronizace nebude odesílat žádné zprávy, kromě těch, které se týkají synchronizace, protože hlavní jednotka by je zahazovala.

Tato zpráva je odesílána bez dalších parametrů.

#### Krok 2: TimeSync\_Request

Zprávu odesílá modul, pro kterého byla určena předchozí zpráva (*TimeSync\_Init*) hlavní jednotce. Při odesílání zprávy si zároveň uloží přesný čas (tj. celé vteřiny a hodnotu RTC počítadla místo desítek milisekund), protože bude použit při výpočtu offsetu.

### Krok 3: TimeSync\_Response

Při přijetí zprávy `TimeSync_Request` si hlavní jednotka uloží přesný čas (`REC_Time`) a zareguluje odpověď `TimeSync_Request`, do které připojí čas odeslání této odpovědi (`XMT_Time`) a čas příjmu požadavku `TimeSync_Request` (`REC_Time`).

<code>REC_Time_s</code> [16 bits]	<code>REC_Time_cnt</code> [16 bits]	<code>XMT_Time_s</code> [16 bits]	<code>XMT_Time_cnt</code> [16 bits]
celé sekundy	hodnota RTC počítadla	celé sekundy	hodnota RTC počítadla

### Krok 4: TimeSync\_Finished

Jakmile koncový modul přijme zprávu `TimeSync_Response`, tak si uloží čas jejího přijetí (`REC2_Time`). V tuto chvíli je možné určit časový offset, který si koncový modul na sobě aplikuje. Nakonec odešle zprávu hlavní jednotce o dokončení synchronizace (`TimeSync_Finished`), do které přidá čas aplikace offsetu. Hlavní jednotka přijatý čas použije k určení platnosti synchronizace, kterou po jeho uplynutí znovu spustí.

Jedná se o poslední krok synchronizace, po jehož dokončení je obnovena běžná funkce hlavní jednotky a modulu (přijímání a vysílání zpráv všech typů).

## Kapitola 7

# Realizace prototypu

Prototyp je postaven za účelem ověření přesnosti navrženého řešení v praxi. V této chvíli není cílem postavit plnohodnotnou časomíru.

### 7.1 Výběr hardware

Při výběru hardware bylo třeba se speciálně zaměřit na výběr mikrokontroléru a bezdrátového modulu. Mikrokontrolér by měl být shodný pro všechny moduly časomíry, nebo alespoň ze stejné rodiny. Díky tomu bude možné znovu použít velké části kódu, případné modifikace budou minimální.

Čip pro bezdrátovou komunikaci musí pracovat v pásmu 868 MHz a je vhodné, aby byly dostupné hotové moduly s tímto čipem. Návrh desky plošných spojů pro vysokofrekvenční část není snadný a je jistější použít hotové řešení. Důležitým kritériem byla také cena. Některé bezdrátové moduly lze pořídit velmi levně v zahraničních eshopech (např. AliExpress.com, DealExtreme – dx.com, eBay.com).

První myšlenka směřovala ke školní platformě FITkit. Ten je osazen MCU Texas Instruments rodiny MSP430. Umožňuje připojit spoustu periférií. Bohužel vývoj na této platformě není úplně pohodlný – zejména kvůli nemožnosti živého debugingu a krokování programu. Přesto byl FITkit použit alespoň při testování.

Začal jsem uvažovat nad návrhem vlastního prototypu – první verzi časomíry. Celý návrh je pro mě (jako nováčka v této oblasti) velmi zdoluhavý a výsledek nejistý. Případné chyby by znesnadnily celý vývoj, protože by bylo nutné řešit problémy návrhu elektrických obvodů prototypu a zároveň softwarové problémy. Přesto se mi podařilo navrhnout některé části vlastního prototypu, které najdete v příloze [A](#).

Vedoucí mé práce mi nakonec doporučil použít k prototypovému vývoji některý z vývojových kitů.

#### 7.1.1 Bezdrátové moduly

Při průzkumu dostupných řešení na trhu jsem narazil na moduly s čipy firem Nordic Semiconductor, Texas Instruments, HopeRF, Amber Wireless.

Cena modulů **Amber Wireless** byla vysoká (přibližně 700 Kč za kus), proto jsem je bez zkoumání parametrů vyřadil.

**Nordic Semiconductor** vyrábí populární čip nRF905, který řada čínských výrobců používá na výrobu hotových modulů. Jeden modul lze pořídit přibližně za 100 Kč.



**HopeRF** nabízí hotové bezdrátové moduly, které mají srovnatelné parametry s čipy Nordic Semiconductor a jejichž průměrná cena za kus je 60 Kč.

**Texas Instruments** vyrábí celou řadu čipů pro bezdrátovou komunikaci. Hotové moduly jsou nejčastěji vyráběny s čipem CC1101. Parametry těchto modulů jsou podobné jako u předchozích dvou firem, jejich cena se pohybuje kolem 100 Kč za kus – tedy stejně jako za moduly Nordic Semiconductor. Velkou výhodou čipů od Texas Instruments je dostupnost softwarového řešení a protokolu SimpliCI TI [13], který je určen pro použití s jejich čipy. Jedná se o jednoduchý protokol určený pro malé bezdrátové sítě.

Protokol SimpliCI TI se zdál být dobře použitelný pro bezdrátovou časomíru a proto jsem se rozhodl použít právě moduly s čipem CC1101 od Texas Instruments. Další výhodou byla přímá podpora Listen Before Talk (pro zajištění duty cycle) a Adaptive Frequency Agility (volba nejméně zarušeného kanálu).

### 7.1.2 Mikrokontrolér

Nabídka MCU je v dnešní době velmi široká. Nejvíce mě zaujala nově vzniklá řada 16bitových mikrokontrolérů firmy Texas Instruments s označením FR, která má nový typ paměti, tzv. FRAM (Ferroelectric Random Access Memory), která kombinuje výhody flash paměti a SRAM. Je stálá jako flash, rychlá podobně jako SRAM, a přitom má nízkou spotřebu.

Dalším důvodem pro volbu mikrokontroléru od TI bylo použití protokolu SimpliCI TI, který je určen pro mikrokontroléry firmy TI, včetně příkladů pro některé vývojové kity.

Minimální požadavky na MCU byly výrazně ovlivněny knihovnou SimpliCI TI (vyžaduje alespoň 10 kB programové paměti a 1 kB RAM) a bezdrátovými moduly (komunikační rozhraní SPI). Pro měření času je požadováno počítadlo RTC (real time clock), které funguje i v režimu nízké spotřeby. Samozřejmostí jsou pull up/down rezistory u pinů obecného použití, což sníží počet externích součástek. Dalšími kritérii byla spotřeba, cena a dostupnost.

Všechny požadavky splňoval mikrokontrolér TI MSP430FR4133 [16, 15], který je osazen i na LaunchPadu (vývojový kit TI) s označením MSP-EXP430FR4133 [14]. Vedoucí práce mi prostřednictvím školy objednal 2 zmíněné LaunchPady, na kterých byl postaven prototyp a provedeno vyhodnocení přesnosti měření.

## 7.2 SimpliCI TI

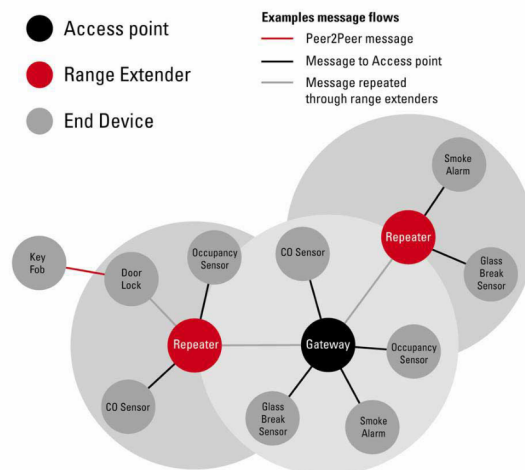
SimpliCI TI je jednoduchý komunikační protokol firmy Texas Instruments pro malé bezdrátové sítě. Pomocí něj je možné vytvořit síť s různou strukturou (příklad sítě je na obr. 7.1). V rámci protokolu jsou podporované tři typy zařízení:

**Access point** – přístupový bod.

**Range extender** – zařízení pro zvětšení dosahu modulů při vzájemné komunikaci (tzv. opakovač).

**End device** – koncové zařízení, které může být v režimu nízké spotřeby a periodicky se dotazovat **access pointu** na příchozí zprávy.

Struktura sítě pro navrhovanou bezdrátovou časomíru bude však mnohem jednodušší. Hlavní jednotka bude sloužit jako přístupový bod, všechny ostatní zařízení budou typu **end device**. Nebude využit **range extender**, protože vzdálenost bezdrátových modulů je dostatečně krátká pro přímou komunikaci. Navíc by **range extender** zkomplikoval synchronizaci času.



Obrázek 7.1: Příklad struktury senzorové sítě vytvořené pomocí SimpliciTI [17]

### 7.2.1 Připojování do sítě

Protokol SimpliciTI je schopný řídit přístup do sítě a to pomocí tzv. **tokenů** (hesel). Celkem jsou používány 2 tokeny – pro přístup do sítě (**join**) a pro vytvoření spojení (**link**).

Postup připojení do sítě je následující:

1. Zařízení, které se chce do sítě připojit zná **join** token a odešle ho zprávou **join** hlavní jednotce.
2. Hlavní jednotka ověří správnost přijatého tokenu a případně odešle žadajícímu zařízení **link** token.
3. Připojované zařízení odešle zprávu **link** s obdrženým tokenem hlavní jednotce.
4. V případě, že hlavní jednotka kladně ověří správnost přijatého tokenu, je navázána obousměrná komunikace.

### 7.2.2 Rozlišení příslušnosti k sestavě časomíry

Každá sestava časomíry bude mít nastaven unikátní **join** token. Tento token bude mít každý modul časomíry uložen ve své trvalé paměti. Po zapnutí modulu časomíry bude možné automatické navázání komunikace na základě uloženého **join** tokenu.

Nebude třeba např. v hlavní jednotce vybírat, který modul patří k časomíře a který je úplně odlišného původu. Taková situace není příliš reálná, ale přesto jí musím předcházet. O něco reálnější je např. použití dvou sestav časomíry na soutěži. Každá sestava bude měřit jinou disciplínu a je možné, aby probíhaly obě disciplíny současně.

V případě, že bude potřeba změnit příslušnost modulu k jiné sestavě časomíry (např. při jejich půjčování), je toto možné pouhým přepsáním **join** tokenu.

## 7.3 Reprezentace času

Jelikož je požadovaná rozlišovací jednotka časomíry 0,01 s, tak nebude stačit běžné UNIXové časové razítko, protože vyjadřuje celočíselný počet sekund. Desetinnou část času bude třeba

ukládat do zvláštní proměnné. Tato proměnná bude reprezentovat počet desítek milisekund. Maximální reálně dosažitelná hodnota je 99, takže zabere 7 bitů.

UNIXové časové razítko má velký počet bitů (nejméně 32), jeho maximální hodnota může dosáhnout až 136 let. Časomíra po zapnutí vždy počítá čas od 0 a nepředpokládá se její nepřetržitý provoz po tak dlouhou dobu. Kvůli úspoře množství dat při přenosu a zrychlení výpočetních operací, je pro uchování celých sekund od zapnutí přístroje použita 16bitová hodnota (maximální hodnota cca 18 h).

### 7.3.1 Udržování času

O udržování času se stará počítač RTC. Zdrojem kmitů je hodinový krystal s frekvencí 32 768 Hz. Počítadlo porovnává svou aktuální hodnotu s hranicí, kterou jsem nastavil na 32 767. Poté dojde k vygenerování přerušení, ve kterém je inkrementován celkový počet sekund a následně vynulováno počítač RTC. Vše se opakuje.

## 7.4 Synchronizace času

Výběr synchronizačního protokolu byl popsán již dříve. Zde budou rozebrána pouze specifik implementace zvoleného protokolu.

Bezdrátové moduly nemají přímou podporu pro synchronizaci času, ani hardwarovou tvorbu časových razítek. To ale příliš nevadí, protože nad odesíláním zpráv mám při využití SimpliCI dostatečnou kontrolu.

Problém nastává při přijímání zpráv, které se mohou hromadit ve frontě. Bezdrátový modul vygeneruje přerušení do MCU, které spustí callback funkci SimpliCI. Provedení této callback funkce se výrazně liší u hlavní jednotky (v roli access point) a ostatních modulů – naměřil jsem 62 ms pro hlavní jednotku a 1 ms pro cílový modul.

Další zpoždění vznikne při čekání na zpracování (parsování) přijaté zprávy, které probíhá mimo obsluhu přerušení. Pokud by k vytvoření časového razítka příchozí zprávy došlo až při jejím parsování, tak se setkáme s chybou přes 60 ms, což je neúnosné.

Řešením je vytvořit si časové razítko při vygenerování přerušení. Jakmile dojde k parsování zprávy, tak bude použito dříve vytvořené časové razítko, které se naváže na konkrétní zprávu. Nemůže se stát, že dvě přerušení jdoucí rychle po sobě znehodnotí data.

Při poslední fázi synchronizace (při výpočtu offsetu) může dojít k dalšímu zpoždění, protože výpočet není triviální. Jedná se ale o statické zpoždění, které lze předvídat, změřit a korigovat.

### 7.4.1 Aplikace offsetu při běžícím čase

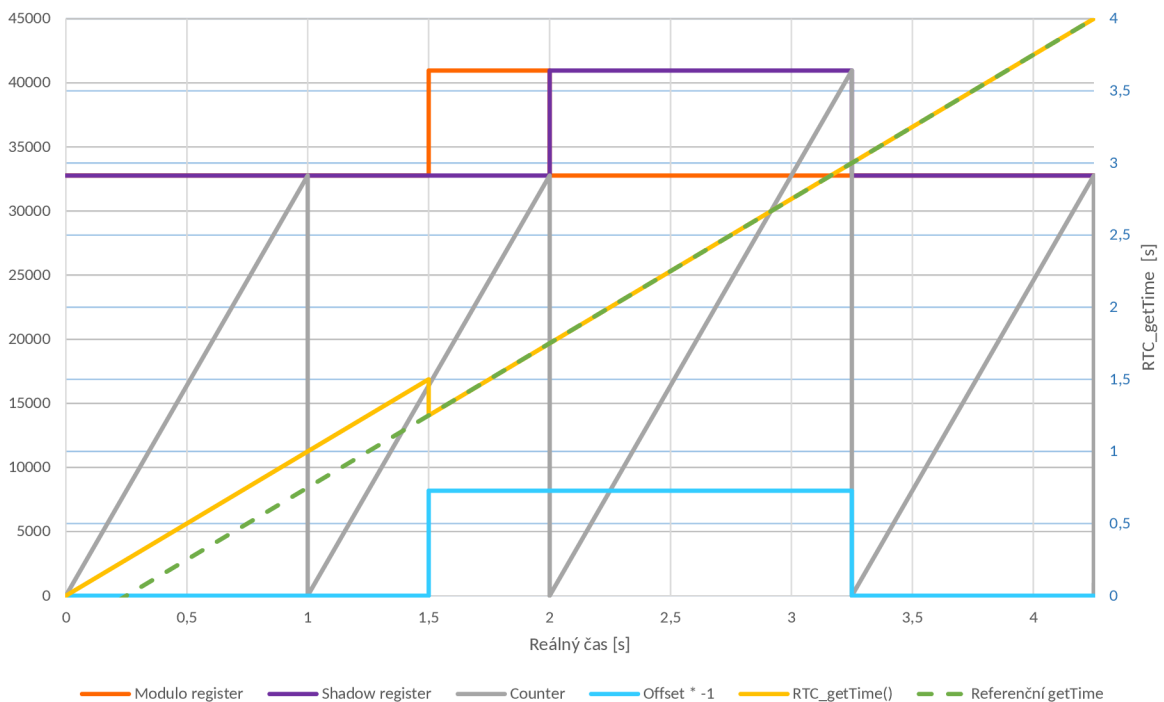
Vypočtený offset je nutné aplikovat na aktuální čas. Přičtení, nebo odečtení celých sekund je realizovatelné bez problémů. Ale modifikace hodnoty čítače RTC není možná (jedná se o vlastnost mikrokontroléru).

Pro některé účely by stačilo mít offset uložen ve speciální proměnné, která se zohlední při získávání aktuálního času pomocí funkce. Připravíme se tak ale o možnost využít přerušení vždy v celou sekundu. Další nevýhodou jsou nemalé nároky na výpočet aktuálního času z hodnoty čítače a offsetu.

Řešením je modifikace prahové hodnoty, proti které se porovnává aktuální hodnota čítače. Požadovaná prahová hodnota je uložena v tzv. modulu registru a vždy při přetečení je nakopírována do stínového registru, který se používá při porovnávání. Modifikace prahové

hodnoty v modulo registru se sice projeví do stínového registru až při přetečení čítače RTC, ale funkce pro získání aktuálního času zohlední offset ihned.

Postup aplikace offsetu při běžícím čase je znázorněn obrázkem 7.2. Na počátku (v čase 0 s) mají modulo registr i stínový registr stejnou hodnotu – 32 767. Moduly nejsou synchronizovány, jejich časy nejsou sjednocené. Volání funkcí pro získání aktuálního času na obou modulech v jeden okamžik vrátí odlišné hodnoty. V čase 1,5 s byla dokončena synchronizace, jejímž výsledkem byl nenulový offset. Od této chvíle volání funkcí pro získání aktuálního času na obou modulech v jeden okamžik vrátí stejné hodnoty (v určité toleranci), protože je zohledněn offset. Hodnota offsetu ovlivní hodnotu modulo registru (např. bude 40 000). V čase 2 s dosáhne RTC čítač hodnoty stínového registru (32 767) a je vygenerováno přerušení. Do stínového registru je přitom automaticky nahrána hodnota modulo registru (40 000). Při obsluze přerušení je hodnota modulo registru vrácena na původní (32 767). Při volání funkce pro získání aktuálního času je pořád zohledňován offset. V čase 3,25 s dosáhne RTC čítač hodnoty stínového registru (40 000) a je vygenerováno další přerušení. Do stínového registru je opět automaticky nahrána hodnota modulo registru (32 767). Při volání funkce pro získání aktuálního času už není zohledňován offset a přitom je vrácen správný (synchronizovaný) čas. Celý proces je tedy dokončen.



Obrázek 7.2: Aplikace synchronizačního offsetu do čítače RTC

## 7.5 Persistentní data

Některá proměnlivá data je nutné udržet i při výpadku napájení. Může se jednat např. o uložené časy aktivace senzorů (které ještě nebyly odeslány do hlavní jednotky), nebo třeba join token. FRAM paměť mikrokontroléru MSP430FR4133 nám to umožní. Nemusíme proto používat např. pomalou flash paměť.

Při implementaci je nutné pro tento účel vyhradit speciální část paměti, které zakážeme

inicializaci. Hodnota do této paměti bude nahrána pouze při programování MCU, ale při resetu nedojde k její opětovné inicializaci (zůstane nedotčena).

## Kapitola 8

# Praktické ověření parametrů navrženého řešení

Tato kapitola se zabývá experimentálním ověřením stěžejních funkcí a vlastností časomíry, jako je přesnost synchronizace a měření pokusů, dosah bezdrátových modulů.

### 8.1 Dosah bezdrátových modulů

Bezdrátové moduly je možné osadit různými anténami, v případě bezdrátové časomíry je vhodné použít všesměrové antény. Hlavním parametrem antény je její zisk, který se udává v dBi, nebo dBm.

Ověření dosahu bezdrátových modulů bylo provedeno pomocí dvou prototypů. Jeden prototyp obsahoval firmware, který periodicky (každou sekundu) odesílal zprávu (na jejím obsahu nezáleželo, proto byla pořád stejná). Druhý prototyp obsahoval firmware, který po přijetí zprávy změnil stav signalizační LED. Při správné komunikaci má blikat LED druhého LaunchPadu s periodou 2 s.

#### 8.1.1 Pružinová anténa

Velmi levnou variantou je pružinová anténa, která mi byla doručena jako součást modulu. Její parametry však nebyly uvedeny.

Při experimentálním měření dosahu jsem zjistil, že při vzdálenosti 30 m dochází ke ztrátě zpráv. Měření probíhalo na volném prostranství (poli) v malé obci Traplice, kde se nepředpokládala přítomnost rušení. Moduly měly na sebe přímý výhled. Výkon vysílače byl nastaven na 0 dBm, baudrate na 76,8 kBaud/s. Při zvýšení výkonu vysílače nad +10 dBm přestala komunikace fungovat, což je pravděpodobně vada antény.

Naměřené parametry pružinové antény považuji za nedostatečné pro bezdrátovou časomíru. Použití této antény není vhodné ani pro startovací modul.

#### 8.1.2 Prutová anténa se ziskem

Při dalším experimentu jsem použil prutovou anténu dlouhou 17 cm s impedancí 50 Ohm. Udávaný zisk je 3 dBi.

Měření dosahu probíhalo za stejných podmínek jako u pružinové antény. Moduly byly schopné spolehlivé komunikace na vzdálenost 150 m i bez přímé viditelnosti (modul zakryt vlastním tělem). Při dalším zvětšování vzdálenost (až na 300 m) byla komunikace spolehlivá

pouze při přímé viditelnosti. Další zvětšování vzdálenosti nemělo smysl kvůli kopcovitému terénu, který vůbec neodpovídá podmínkám, ve kterých bude časomíra používána.

Stejné měření jsem provedl i ve městě Brně na ulici Purkyňova. Naměřil jsem prakticky stejné výsledky jako v obci Traplice.

Dosah prutové antény je více než dostatečný. Její použití je vhodné pro všechny moduly bezdrátové časomíry.

## 8.2 Přesnost synchronizace

Přesnost synchronizace modulů je klíčová pro správné měření času pokusů. Při implementaci synchronizačního algoritmu vznikla potřeba základního ověření správnosti synchronizace v domácích podmínkách. Následně byly výsledky ověřeny měřením v laboratoři.

### 8.2.1 Základní ověření přesnosti

Na LCD displeji každého LaunchPadu je zobrazován aktuální čas s přesností 0,01 s. Pouhým okem je možné pozorovat a porovnat spolehlivě pouze celé vteřiny. Při použití zpomaleného záznamu z kamery bylo možné srovnat pouze desetiny sekundy. Setiny sekundy se měnily příliš rychle a LCD displej nestíhal tyto změny zobrazovat.

Pro porovnání přesnosti synchronizace na úrovni setin sekundy je použita LED LaunchPadu. Ta změní svůj stav přesně v celou sekundu. Při použití kamery se zpomaleným záznamem je možné přibližně určit přesnost synchronizace. Měření konkrétní hodnoty ale není možné běžnou kamerou, která snímá obraz rychlostí 25 fps. Proto byl místo LED připojen FITkit s jednoduchým programem speciálně navrženým pro toto měření. Pomocí FITkitu byla změřena přesnost synchronizace mezi 0 a 1 ms, rozlišovací jednotka je 1 ms.

### 8.2.2 Přesné stanovení v laboratoři

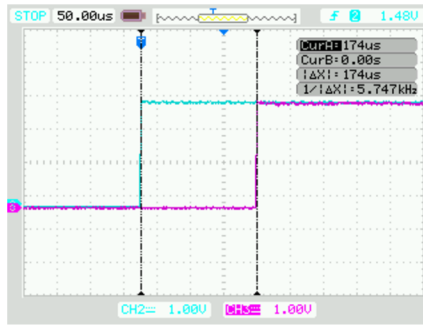
Základním měřením pomocí FITkitu bylo zjištěno, že přesnost synchronizace je dostačující. Zároveň mě zajímaly konkrétní čísla, které byly ale na hranici přesnosti tohoto měření.

FITkit byl nahrazen osciloskopem, na který byly připojeny LED výstupy LaunchPadů. Tlačítkem byla vynucena synchronizace modulů a následně byly na osciloskopu srovnávány signály reprezentované napětím přivedeným na LED diody LaunchPadů. Srovnání bylo provedeno ihned po synchronizaci, dále 10, 30, 60 a 120 s po synchronizaci. Výstupy z osciloskopu (výstup v čase 0 s po synchronizaci je na obrázku 8.1) byly zpracovány do tabulky 8.1, kde jsou zapsány naměřené hodnoty zpoždění ( $t_{LED1} - t_{LED2}$ ) v závislosti na uplynulé době od synchronizace.

Doba od synchronizace [s]	Změřený rozdíl [ $\mu$ s]	Absolutní hodnota rozdílu [ $\mu$ s]
0	174	174
10	150	150
30	104	104
60	-36	36
120	-100	100

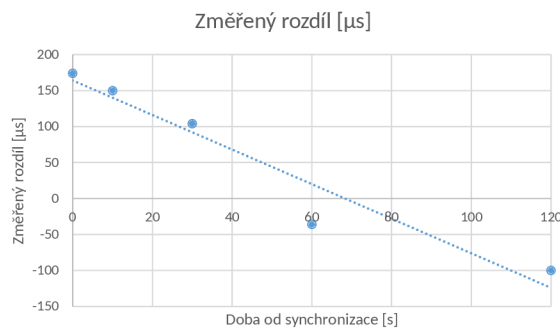
Tabulka 8.1: Naměřené hodnoty zpoždění mezi 2 moduly

Ihned po synchronizaci byla naměřena absolutní hodnota zpoždění pouhých 174  $\mu$ s, což je velmi dobrý výsledek. Po 2 minutách se absolutní hodnota zpoždění zlepšila na 100  $\mu$ s,



Obrázek 8.1: Výstup z osciloskopu při měření zpoždění ihned po synchronizaci

ve skutečnosti ale došlo k posunu o  $274 \mu\text{s}$  proti hodnotě naměřené ihned po synchronizaci. Na grafu 8.2 je vidět, že se naměřené hodnoty mění s časem přibližně lineárně, což je pravděpodobně způsobeno nepřesností krystalů, která je zde v požadované toleranci.



Obrázek 8.2: Graf naměřených hodnot zpoždění mezi 2 moduly

### 8.3 Přesnost měření pokusu

Přesnost měření závodních pokusů závisí pouze na přesnosti synchronizace jednotlivých modulů. Přesto jsem provedl další experimentální ověření přesnosti za pomoci FITkitu s jednoduchým programem speciálně navrženým pro měření časového rozestupu 2 událostí (postupného stisknutí 2 tlačítek). Jedno měření tedy prováděl FITkit a zároveň prototyp bezdrátové časomíry. Naměřená přesnost byla mezi 0 a 1 ms, přičemž rozlišovací jednotka byla 1 ms. Byly měřeny události s časovým rozpětím od 10 do 120 s.



## Kapitola 9

# Závěr

Po nezbytném seznámení s hlavními disciplínami požárního sportu (běh na 100 m s překážkami, štafeta 4×100 m s překážkami, požární útok a výstup do 4. podlaží cvičné věže) byly prozkoumány používané prvky (zejména senzory) elektronické časomíry. Zjištěná spolehlivost a odolnost proti poruchám byla nedostatečná. Proto byl navržen nový způsob, jak spolehlivě získat platnou hodnotu stavu senzoru. Zároveň byla zachována zpětná kompatibilita s běžnými senzory, které se používají u časomír jiných výrobců.

Hlavní částí práce byl návrh systému, který nahradí až 100 m dlouhé kabelové spoje bezdrátovým řešením se srovnatelnou spolehlivostí. Podařilo se mi navrhnout systém s vyšší spolehlivostí, který je nezávislý na dočasném rušení v bezdrátové síti a přitom dosahuje požadované přesnosti měření 0,01 s. Tato odolnost systému je možná díky synchronizaci hodin mezi jednotlivými moduly časomíry, což si vyžádalo důkladný průzkum dostupných synchronizačních algoritmů a nakonec návrh vlastního hybridního algoritmu.

Za účelem ověření přesnosti navrženého řešení v praxi byl postaven prototyp časomíry na vývojových deskách Texas Instruments s mikrokontrolérem MSP430FR4133. Bezdrátovou komunikaci zajišťovaly moduly s čipem Texas Instruments CC1101 připojené k vývojovým kitům pomocí sběrnice SPI. Důležitou roli při výberu hardware sehrál komunikační protokol SimpliciTI, který je vhodný pro malé bezdrátové sítě a jehož softwarové řešení je dostupné pro mikrokontroléry firmy Texas Instruments.

Při praktickém ověření parametrů bezdrátového řešení byl změřen dosah bezdrátových modulů až 300 m při přímé viditelnosti a s anténou o zisku 3 dBi. Naměřený dosah je dostatečný pro drtivou většinu soutěží v požárním sportu. Dalším měřeným parametrem byla přesnost synchronizace hodin mezi jednotlivými moduly. Ta byla nejprve naměřena v rozmezí 0 až 1 ms pomocí FITkitu s přesností na 1 ms. Následné měření v laboratoři pomocí osciloskopu ukázalo přesnost synchronizace 174  $\mu$ s. Přesnost měření závodního pokusu je přímo ovlivněna přesností synchronizace, která je velmi dobrá, a proto se podařilo s rezervou zajistit požadovanou rozlišovací jednotku 0,01 s.

Na trhu s bezdrátovými časomírami se objevují bezdrátová řešení, která fungují na principu bezdrátového zvonku, a nedokáží zajistit spolehlivost měření, ani dostatečnou přesnost. Vzniklo také několik vysokoškolských závěrečných prací, které navrhovaly bezdrátové řešení časomíry, většinou ale pouze po elektrotechnické stránce. Synchronizaci hodin se zabývaly pouze 2 závěrečné práce, při jejichž prostudování jsem shledal vybrané synchronizační protokoly jako nevhodné.

Nad rámec zadání jsem započal návrh cílového modulu časomíry na vlastním hardware. V další fázi bych rád dokončil návrh sestavy časomíry (včetně zobrazovacího panelu), kterou budu testovat při trénincích a závodech v disciplínách požárního sportu.



# Literatura

- [1] Degrees of protection provided by enclosures (IP Code). *ANSI/IEC 60529-2004*, 2004-11-03.
- [2] IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems. *IEEE Std 1588-2008 (Revision of IEEE Std 1588-2002)*, 2008: s. c1-269, doi:10.1109/IEEESTD.2008.4579760.
- [3] Frydrych, M.: *Bezdrátová elektronická časomíra s velkým LED zobrazovačem*. magisterská práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010.
- [4] Gál, M.: *Sportovní bezdrátová časomíra*. bakalářská práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014.
- [5] GŘ HZS ČR: Pravidla požárního sportu [online]. <http://www.hzscr.cz/soubor/pravidla-ps-2010-finalni-verze-zmeny-pdf.aspx>, 2010 [cit. 2015-01-20].
- [6] Libor Valeš: Časomíra, Elektronické ukazatele - Ing. Libor Valeš [online]. <http://www.casomiry.com/>, [cit. 2015-02-13].
- [7] Marek Kysela: Časomíra pro hasičské závody, sportovní zápasy a ukazatel skóre [online]. <http://www.markytronic.cz/>, [cit. 2015-02-13].
- [8] Mills, D.: Simple Network Time Protocol (SNTP) Version 4 for IPv4, IPv6 and OSI [online]. <http://www.ietf.org/rfc/rfc5905.txt>, leden 2006 [cit. 2015-05-08].
- [9] Mills, D.; Delaware, U.; Martin, J.; aj.: Network Time Protocol Version 4: Protocol and Algorithms Specification [online]. <http://www.ietf.org/rfc/rfc5905.txt>, červen 2010 [cit. 2015-05-08].
- [10] Novobilský, P.: *Systém elektronické časomíry s bezdrátovým připojeným terčů a hlavního zobrazovače*. bakalářská práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009.
- [11] Požáry.cz: Kontejner HZS MSK s časomírou pro požární sport [online]. <http://www.pozary.cz/clanek/13146-kontejner-hzs-msk-s-casomirou-pro-pozarni-sport/>, [cit. 2015-02-13].
- [12] Sdružení hasičů Čech, Moravy a Slezska: Směrnice hasičských sportovních soutěží pro muže a ženy [online]. [http://www.dh.cz/index.php?option=com\\_content&view=article&id=1383:uorhs-](http://www.dh.cz/index.php?option=com_content&view=article&id=1383:uorhs-)

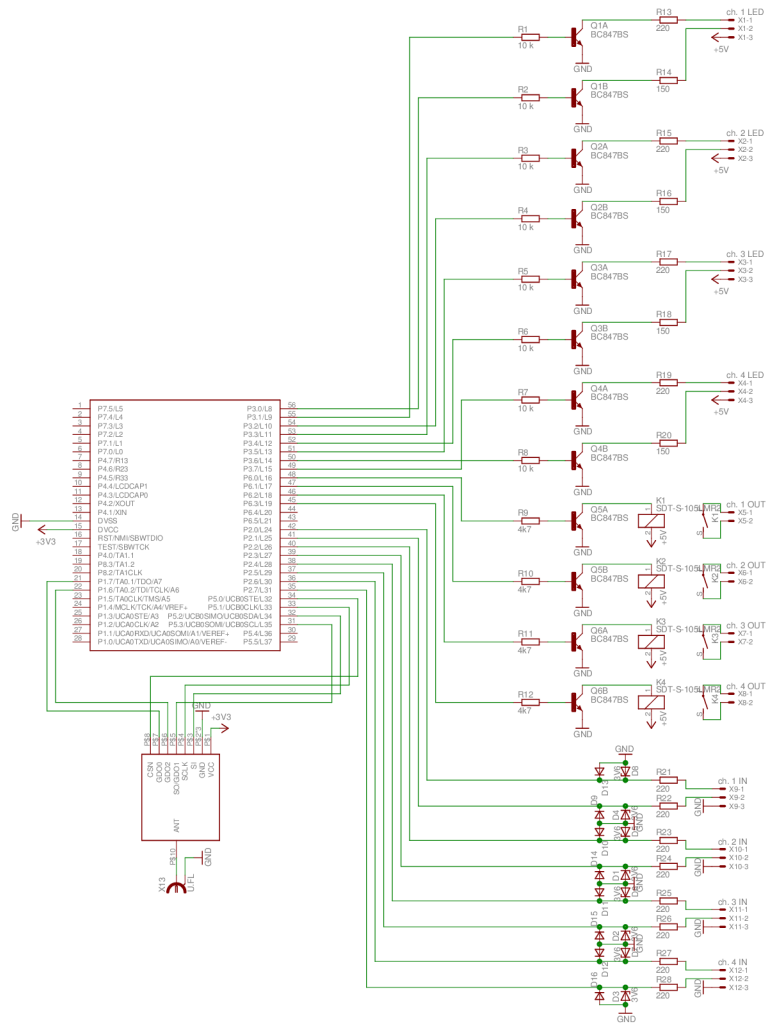
- pipravila-novelu-&catid=60:poarni-sport&Itemid=81, 2011-06-16 [cit. 2015-01-20].
- [13] Texas Instruments: SimpliTI Compliant Protocol Stack [online]. <http://www.ti.com/tool/SimpliCITI>, [cit. 2015-05-10].
- [14] Texas Instruments: MSP430FR4133 LaunchPad Development Kit - MSP-EXP430FR4133 [online]. <http://www.ti.com/tool/msp-exp430fr4133>, [cit. 2015-05-18].
- [15] Texas Instruments: MSP430FR413x Mixed-Signal Microcontrollers (Rev. A) [online]. <http://www.ti.com/lit/gpn/msp430fr4133>, [cit. 2015-05-18].
- [16] Texas Instruments: MSP430FR4xx and MSP430FR2xx Family User's Guide [online]. <http://www.ti.com/lit/pdf/slau445>, [cit. 2015-05-18].
- [17] Texas Instruments: SimpliTI structure (fotka) [online]. [http://www.ti.com/graphics/tool/simplificiti\\_picture\\_989.jpg](http://www.ti.com/graphics/tool/simplificiti_picture_989.jpg), [cit. 2015-05-18].
- [18] Texas Instruments: TI GPS PPS Timing Application Note [online]. [http://processors.wiki.ti.com/images/f/f1/TI\\_GPS\\_PPS\\_Timing\\_AppNote.pdf](http://processors.wiki.ti.com/images/f/f1/TI_GPS_PPS_Timing_AppNote.pdf), leden 2012 [cit. 2015-05-08].
- [19] Tomáš Kocáb: Požární sport - TRVelektronik - Tomáš Kocáb [online]. <http://www.trv-kocab.cz/cs/9-pozarni-sport>, [cit. 2015-02-13].
- [20] TRV: Startovací pistole (fotka) [online]. <http://www.trv-kocab.cz/50-73-thickbox/startovaci-pistole-9mm.jpg>, [cit. 2015-05-18].
- [21] Vondrák, M.: *Duální digitální časomíra řízená mikrokontrolérem*. bakalářská práce, Vysoká škola polytechnická Jihlava, Katedra elektrotechniky a informatiky, 2011.
- [22] WWW stránky: Světelné časomíry — Hasiči, Požární sport [online]. <http://www.eal-tia.cz/e-shop/svetelne-casomiry/hasici-pozarni-sport/>, [cit. 2015-02-13].
- [23] X-flame.cz: Časomíra model S-150 (fotka) [online]. [http://www.x-flame.cz/\\_obchody/barbora.shop5.cz/prilohy/4/casomira-model-s-150-0.jpg.big.jpg](http://www.x-flame.cz/_obchody/barbora.shop5.cz/prilohy/4/casomira-model-s-150-0.jpg.big.jpg), [cit. 2015-05-18].
- [24] Ye, J.: GPS Time Synchronization [online]. <http://www.physics.smu.edu/~yejb/GPSPaper.pdf>, [cit. 2015-05-08].
- [25] Český telekomunikační úřad: Všeobecné oprávnění č. VO-R/10/05.2014-3 k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení krátkého dosahu [online]. [https://www.ctu.cz/cs/download/oop/rok\\_2014/vo-r\\_10-05\\_2014-03.pdf](https://www.ctu.cz/cs/download/oop/rok_2014/vo-r_10-05_2014-03.pdf), 2014-05-07 [cit. 2015-05-09].
- [26] Český telekomunikační úřad: VYUŽITÍ RÁDIOVÉHO SPEKTRA Beta verze [online]. <http://spektrum.ctu.cz/kmitocty/>, [cit. 2015-05-18].

- [27] Šostý, R.: *Časomíra pro požární sport využívající bezdrátové technologie*. magisterská práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií, 2014.

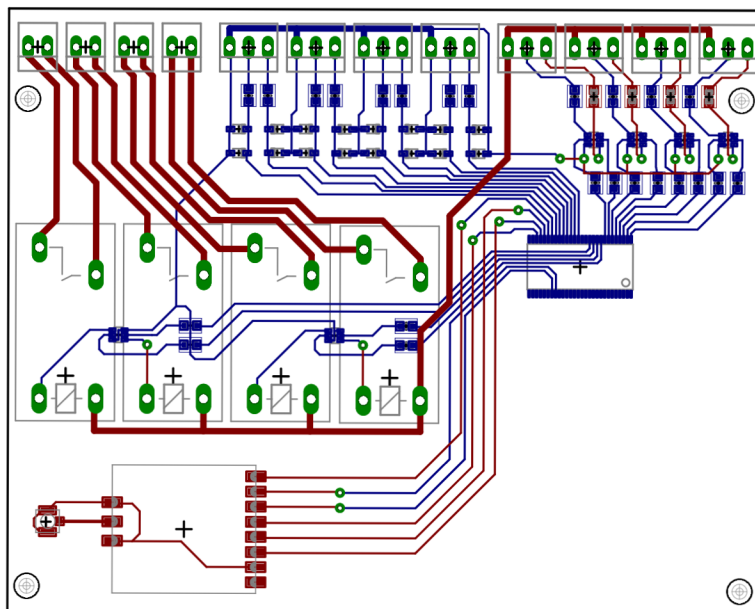
# Příloha A

## Vlastní prototyp cílového modulu

Mým cílem je nejen dokončit bakalářskou práci, ale postupně vyrobit funkční sestavu bezdrátové časomíry. Proto jsem se rozhodl nad rámec zadání navrhnout jednotlivé moduly časomíry. Návrh jsem prováděl v programu Eagle bez předchozích zkušeností. Na následujících obrázcích je pracovní schéma cílového modulu a návrh desky plošných spojů.



Obrázek A.1: Schéma zapojení cílového modulu



Obrázek A.2: Deska plošných spojů cílového modulu

# Příloha B

## Obsah CD

- /Casomira\_CilovyModul/** Projekt pro Code Composer Studio 6.1 obsahující firmware cílového modulu časoměry realizované na LaunchPadu EXP430-FR4133.
- /Casomira\_HlavniJednotka/** Projekt pro Code Composer Studio 6.1 obsahující firmware hlavní jednotky časoměry realizované na LaunchPadu EXP430-FR4133.
- /CC1101 RangeTest/** Projekt pro Code Composer Studio 6.1 obsahující firmware k otestování dosahu bezdrátových modulů podle popsaného postupu. Podrobnosti jsou v souboru README.md.
- /FITkit - měření přesnosti synchronizace/** Projekty pro QDevKit obsahující firmware pro MCU FitKitu.
- /FITkit - měření přesnosti synchronizace/casomira\_zpozdeni/** Nástroj pro FitKit k určení přesnosti synchronizace dvou modulů.
- /FITkit - měření přesnosti synchronizace/casomira\_mereni/** Nástroj pro FitKit k určení přesnosti měření závodních pokusů.
- /Měření - výstupy osciloskopu/** Výsledky měření na osciloskopu v laboratoři – screenshoty obrazovky osciloskopu.
- /Schémata/** Schémata a DPS vlastního prototypu.
- /Textová část/** Zdrojové soubory L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>Xpřeložitelné pomocí příkazu `make`.
- /Textová část/bp.pdf** Text práce ve formátu `.pdf`.