VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

SPORTOVNÍ BEZDRÁTOVÁ ČASOMÍRA

WIRELESS SPORTS TIMER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE MAREK GÁL
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. PETR PETYOVSKÝ
SUPERVISOR

BRNO 2014

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Automatizační a měřicí technika

Student: Marek Gál ***ID:*** 146821
Ročník: 3 ***Akademický rok:*** 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Sportovní bezdrátová časomíra

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je navrhnout a realizovat modifikace zařízení pro měření času v oblasti sportovních aktivit.

1. Seznamte se s dostupnými řešeními měření času ve sportu a zhodnoťte jejich výhody a možnosti. Popište i předchozí vlastní řešení časomíry.
2. Na základě nastudovaných znalostí navrhněte vylepšení a rozšíření nové sportovní časomíry.
3. Navrhněte rozdělení měřicího systému na samostatné komponenty a navrhněte jejich vzájemnou komunikaci.
4. Navrhněte vnitřní uspořádání jednotlivých samostatných komponent, včetně požadavků na firmware.
5. Realizujte a oživte HW komponenty měřicího systému.
6. Implementujte firmware pro jednotlivé komponenty.
7. Proveďte experimentální měření a zpracujte získané výsledky.
8. Zhodnoťte dosažené výsledky a diskutujte problémy vzniklé při implementaci.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Virius, M. : Jazyky C a C++, Grada 2006, ISBN 80-247-1494-9
[2] PIC24FJ256GB210 Family Data Sheet. In: Microchip Technology Inc. [online]. 1998-2014 [cit. 30.1.2014]. ISBN 978-1-60932-209-0. Dostupné z: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39975a.pdf

Termín zadání: 10.2.2014 ***Termín odevzdání:*** 26.5.2014

Vedoucí práce: Ing. Petr Petyovský
Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
Předseda oborové rady

Abstrakt

Náplní této bakalářské práce je návrh a realizace univerzální časomíry pro sportovní účely za použití bezdrátové komunikace mezi jednotlivými komponenty. Cílem je dosažení maximální mobility, spolehlivosti a uživatelské jednoduchosti. Práce se nezabývá samotnými snímacími prvky měřicího systému, pouze uvádí typové příklady jejich použití. Obsahem je návrh primární měřicí jednotky, která bude zajišťovat samotné měření času s rozlišením minimálně 0,01s, a sekundární jednotky, která bude sledovat informace ze snímacích prvků a ty bude dále předávat primární jednotce ke zpracování. Práce zahrnuje způsob komunikace, hardwarovou část jednotlivých komponent a popisuje použitý firmware.

Klíčová slova

Měření času, časomíra, sport, synchronizace času, mikrokontrolér, bezdrátová komunikace, komunikační modul.

Abstract

This work deals with design and realization of universal sport timer and uses wireless communication between individual components. The purposes is to achieve maximum mobility, reliability and simplicity for users. This work doesn‘t deal with sensing elements of measuring system, it only provides examples of their typical usage. The content of this proposal is the primary unit, which will ensure time measurement with 0,01s resolution and the secondary unit, which will track a sensing elements and provide information for processing to primary unit. The design comprises communication method, hardware of all devices and firmware.

Keywords

Time measuring, timer, sport, time synchronization, microcontroler, wireless communication, communication module.

Biblografická citace

GÁL, M. *Sportovní bezdrátová časomíra.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 63 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Petyovský.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Sportovní bezdrátová časomíra jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.“

V Brně dne: 24. května 2014 ……

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Petru Petyovskému za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: 24. května 2014 ……

podpis autora

Obsah

Úvod **9**

1 Současná řešení **10**

1.1 Dostupné varianty na trhu 10

1.2 První verze vlastní časomíry 12

2 Návrh nové sestavy **14**

2.1 Požadavky na zařízení 14

2.2 Komponenty 15

2.2.1 Primární jednotka 15

2.2.2 Sekundární jednotka 15

2.2.3 Koncové prvky 15

2.2.4 Další možná rozšíření 16

2.3 Vzájemná komunikace 17

2.3.1 Sériová sběrnice 18

2.3.2 Bezdrátová komunikace 19

2.3.3 Eliminace zpoždění přenosu 20

2.3.4 Základní model bezdrátové komunikace 21

2.3.5 Rozšířený model bezdrátové komunikace 21

2.3.6 Detekce kolize 22

2.3.7 Časová synchronizace 22

2.3.8 Bezdrátový modul 24

3 Návrh hardwaru **28**

3.1 Primární jednotka 28

3.1.1 Mikrokontrolér 28

3.1.2 Vstupní modul 30

3.1.3 Návrh obvodu s MCU 31

3.1.4 Generátor hodinového signálu 32

3.1.5 Napájecí modul 32

3.2 Sekundární jednotka 34

3.2.1 Mikrokontrolér 34

3.2.2 Návrh obvodu s MCU 35

3.2.3 Vstupní a výstupní modul 36

3.2.4 Napájecí modul 37

4 Realizace komponent 40
4.1 Primární jednotka 40
4.2 Sekundární jednotka 43
5 Firmware 45
5.1 Měření času 45
5.2 Bezdrátová komunikace 46
5.3 Časová synchronizace 48
5.4 Měření drátovou variantou 48
5.5 Nastavení sekundární jednotky 49
5.6 Shrnutí principu měření 49
5.7 Řešení přerušení 49
5.8 Uživatelské rozhraní primární jednotky 49
6 Experimentální měření 50
6.1 Měření časového intervalu 50
6.2 Měření rozdílu času po synchronizaci 51
6.3 Testování vstupních modulů 52
7 Závěr 55

ÚVOD

Měření času ve sportu neodmyslitelně patří k metodě srovnání výkonu sportovců. Často se jedná o vůbec jedinou možnost pro porovnání výsledků a určení jasného vítěze. Díky snaze neustále se zlepšovat se člověk často dostává na hranice lidských možností a v dané sportovní disciplíně se blíží časové hranici, kterou již lze těžko překonávat. Výsledky mezi jednotlivými soutěžícími se pak často liší pouze ve zlomcích sekundy. Odtud tedy plynou současné nároky na měření času ve sportu.

V dřívějších dobách se pro měření času využívalo například natahovacích stopek, jejichž přesnost nebyla vůbec ideální. Tyto stopky dosahovaly rozlišení pouze na desetiny sekundy, což dnešní požadavky již nepřipouští. Dalším velkým problémem při měření ručními stopkami byla reakční doba časoměřiče, která do měření zaváděla velkou chybu. Výsledné měření tak bylo nepřesné.

S nástupem digitální éry se ve sportovním odvětví začaly častěji objevovat elektronické časoměrné systémy, které automatizací měření eliminovaly chyby lidského faktoru. Problémem spousty těchto systémů je však vysoká cena a složitost celého zařízení. V případě použití časomíry na samotném sportovním klání jsou tyto zápory zanedbatelné. O mnohem horší je však situace při přípravě a výcviku. Měření času je i zde velmi důležitým aspektem, sloužícím především pro odhalení chyb a jejich eliminaci. Právě zde jsou kladeny nároky především na mobilitu a jednoduchost takovéhoto zařízení.

To co mě vedlo ke stavbě bezdrátové časomíry, byly právě tyto tréninkové účely. Ve spolupráci se Sborem dobrovolných hasičů ve Tvrdonicích jsem již vyrobil, coby ročníkovou práci na střední škole, první prototyp podobného zařízení, které bylo tři roky využíváno a testováno pro měření času při požárním útoku. Původní plánované ambice tohoto prototypu však nebyly zcela naplněny z důvodu špatné volby hardwaru. Proto jsem se rozhodl projekt znovu otevřít, přepracovat jej a s ohledem na získané zkušenosti z předešlého tříletého provozu vytvořit plně funkční systém pro měření času, ať už pro požární sport, či jiná sportovní odvětví.

Cílem je tedy vytvořit co možná nejjednodušší, odolný, vysoce mobilní univerzální časoměrný systém se spolehlivým provozem. S ohledem na tyto nároky byla zvolena právě bezdrátová komunikace, díky níž není uživatel obtěžován zdlouhavou přípravou měření při roztahování a následném balení například až 100m dlouhých kabelů. I přesto je však žádoucí tuto drátovou variantu zachovat z důvodu kompatibility se současnými časoměrnými systémy. Dalším cílem je návrh hardwaru, jehož potenciál bude převyšovat základní požadavky samotného měření za použití bezdrátové komunikace a umožní tak další budoucí vývoj zařízení.

1 SOUČASNÁ ŘEŠENÍ

Tato kapitola zahrnuje přehled dostupných časoměrných zařízení na trhu a především srovnává jejich výhody a nevýhody v různých provedeních, včetně již existujících bezdrátových variant. Ve druhé části je pak popsána první verze vlastní bezdrátové časomíry i se svými problémy a poznatky na její dosavadní tříletý provoz.

1.1 Dostupné varianty na trhu

Vzhledem k oblíbenosti automatického měření času je možné na trhu nalézt skutečně velkou škálu dostupných zařízení. Tyto časomíry jsou ale převážně určeny pro oficiální soutěžní využití. Většina těchto systémů je tak z důvodu zajištění maximální spolehlivosti založena na drátovém provedení, které nenaplňuje charakter mobilního zařízení. Produkty se tak stávají nevhodné pro tréninkové využití, kde je předpoklad rychlého zprovoznění a použití časomíry. Převažuje zde právě aspekt spolehlivosti. Ta je však také do jisté míry omezená. Příklad provedení časomíry zobrazuje *obrázek 1*.

Obrázek 1*-komerčně dostupná časomíra [3]*

Vodiče jsou při častém používání na různých místech velmi namáhané a snadno může dojít k jejich přerušení. Kabely jsou často kvůli své délce voleny co možná nejtenčí pro dobrou skladnost a transport. Tím ještě riziko přerušení narůstá. Záleží taky, kudy je vodič veden. Ideální variantou je pevná vestavba na sportoviště. Tedy zabudování signálního vodiče do země. V případě této varianty jsou však kladeny velké nároky na chemickou stálost a odolnost vodiče vůči vlivům, kterým je v půdě vystaven. Vodič zde však nepodléhá mechanickému namáhání, jako tomu může být při vedení po povrchu. Zvláště v případě, je-li nutné jej vést místem, kudy prochází větší množství osob. Riziko zde ještě narůstá, pokud soutěžící používají, jako je tomu zvykem například v požárním sportu, běžecké tretry. Snadno dojde k prošlápnutí kabelu a následné nepříjemné situaci s nefunkční časomírou.

Další nevýhodou kabelové varianty je nutnost použití konektorů. Vždy platí nepsané pravidlo o nadbytečných spojích, které jsou často zdrojem poruch jakéhokoliv systému. Zvláště v případě, je-li zařízení provozováno v náročných podmínkách, často například za deště. Dochází k oxidaci kontaktů, což může vést k nedokonalému spojení

vodiče například s měřicí jednotkou. Těmto zdrojům poruch se však lze vyhnout dobrou údržbou a pravidelnou obměnou materiálu, ať už samotných vodičů nebo konektorů. Tato prevence se však stává finančně náročnou a ne vždy je tak možné ji realizovat.

Na trhu lze nalézt i bezdrátové varianty pracující v bezlicenčním ISM pásmu. Většinou se však jedná o značně nespolehlivé a tudíž i neoblíbené varianty. Největším problémem těchto systémů je nevhodné použití bezdrátových modulů. Často se jedná pouze o modul typu „zvonek“, kdy při aktivaci koncového prvku dojde pouze k dálkovému sepnutí tranzistoru v přijímači a tím předání informace i stavu koncového prvku. Často se taky používají moduly s amplitudovou modulací, které jsou mnohem náchylnější na vlivy rušení. Největším problémem těchto systémů je však závislost na okamžiku sepnutí. Pokud dojde k poškození zaslaného paketu, přijímač zprávu považuje za neplatnou a jednoduše ji zahodí. Nedochází zde ani ke kontrolní odezvě, zda byla zpráva přijata. K tomu taky není důvod. Pokud by došlo k opožděnému znovuodeslání paketu, dojde již ke ztrátě správného okamžiku zastavení, tedy opoždění způsobené průběhem komunikace a tím ke zkreslení výsledku. Ke zpoždění dochází i v případě jednorázového platného přijetí zprávy. Vše závisí na délce paketu a vysílací rychlosti bezdrátového modulu. Zpoždění je většinou minimální, ovšem přesto může hrát důležitou roli v samotném měření.

Dalším problémem je okamžik, kdy dojde k zastavení více časů za dobu kratší než je rozlišovací čas měření. Pokud mikrokontrolér právě předává informaci o zastavení prvního času bezdrátovému modulu a mezi tím dojde k podnětu pro zastavení času druhého, tato informace již musí počkat, až bezdrátový modul předá první zprávu a uvolní linku pro zprávu druhou. I zde tak dochází ke zpoždění a výsledné časy, přestože by měly mít stejnou hodnotu, se například o 0,01s liší.

Tento problém lze eliminovat použitím samostatných bezdrátových modulů pro každý měřený čas. Díky tomu však vzniká problém jiný a to možnou kolizí vysílaného paketu. Pokud začnou dva vysílače odesílat zprávu na stejné frekvenci, dojde ke zkreslení obou zpráv a nedojde k zastavení daných časů. Řešením je použití různých frekvencí pro různé cílové prvky. Zde se však dostáváme k omezení v podobě dostupných volných pásem pro bezdrátový přenos a narazíme na vyšší celkovou cenu zařízení.

Jinou variantou řešení problému zastavení více časů najednou, je přenesení samotného měření na cílovou jednotku. Výsledné časy jsou pak pouze do hlavní jednotky datově přeneseny až po zastavení měření. Je zde však nutné cílové jednotce předat zprávu o začátku měření, které je stále závislé na přesném časovém okamžiku. Tuto variantu použil například jiný student v podobné práci [8].

Další nevýhodou komerčně dostupných časomír je způsob jejich napájení. Tato zařízení v sobě často nemají akumulátor a je nutné je napájet externím zdrojem energie,

což může být v případě využití časomíry v terénu mimo zdroje energie značný problém. Pokud už v sobě akumulátor mají, neobsahují obvykle nabíjecí obvod a je často nutné mít též speciální nabíjecí adaptér pro jeho dobití.

Největším problémem dostupných časomír je však jejich, někdy až nesmyslně vysoká, pořizovací cena, díky které jsou tyto komerční zařízení naprosto nedostupné pro některé potenciální uživatele.

1.2 První verze vlastní časomíry

První verzi své bezdrátové časomíry jsem sestavil v průběhu 4. ročníku Střední odborné školy průmyslové Edvarda Beneše a středního odborného učiliště v Břeclavi v rámci své ročníkové práce. Projekt nesl název *Bezdrátová časomíra pro požární sport*. Výsledky práce byly uspokojivé, ovšem původní záměry a potenciál celého zařízení nebyl zcela naplněn. Důvodem byla nevhodná volba mikrokontroléru výrobce *Microchip* typu *PIC16F73*, který neumožnoval připojení dalších potřebných periferií, což vedlo k omezení měřených časů na pouhé dva. Systém nebyl kompatibilní s jinými systémy měření času, neumožňoval připojení k PC pro zálohu a zpracování výsledků ani nedisponoval výstupem na případný velkoformátový LED zobrazovač. Největším problémem však byla velmi malá flash paměť, která sotva stačila pro naprogramování potřebných rutin a to i přes to, že byl firmware napsán kompletně v assembleru.

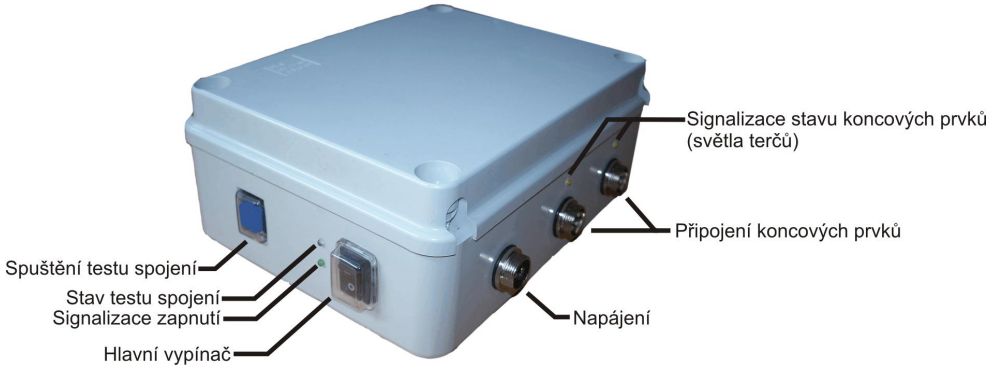
***Obrázek 2**-ukázka řídicí jednotky 1. verze časomíry*

Systém se skládal ze dvou jednotek. Řídicí (*obrázek 2*), která obstarávala měření času a zobrazovala je na alfanumerický display o velikosti 2x16 znaků, a cílová jednotka (*obrázek 3*), která sledovala signál z čidel a zasílala informaci o jejich aktivaci. Mezi jednotkami bylo možné spustit test spojení, který obsahoval 50 zkušebních paketů od cílové jednotky. Tím se ověřilo, zda na sebe obě jednotky „vidí“ a zda je možné

provést měření. Výsledek testu byl zobrazen na alfanumerickém displeji, stejně tak signalizací LED na cílové jednotce.

Ke spuštění měření došlo po stisku tlačítka přímo na řídicí jednotce, či drátovým dálkovým ovladačem, který byl opatřen mikrofonem a potřebnou elektronikou pro zvukové spuštění měření pomocí startovací pistole.

Pro bezdrátovou komunikaci zde byl využit modul firmy *HOPE Microelectronic,* konkrétně model *RFM12B* [10]. Modul využívá FSK modulaci a disponuje výkonem 5dBm. Modul se ukázal jako dostatečný pro přenos dat na potřebnou vzdálenost 100m. Maximální dosah se pohyboval okolo 150m. Potíž v přenosu dat nastal v případě, kdy byla anténa modulu umístěna těsně u země. Tehdy byl dosah přibližně pouhých 30m. Bylo tedy nutné vyvést anténu ven z krabice a na koaxiálním kabelu ji připevnit k vyššímu bodu. Tato maličkost se jako komplikace neprojevila a to z důvodu, že v dosahu cílového zařízení se většinou nachází vyzdvižený bod, ať už optobrána, či terč sloužící v požárním útoku jako koncový prvek.



Obrázek 3*-cílová jednotka 1. verze časomíry*

Princip komunikace zde byl závislý právě na přesném okamžiku signalizace koncového prvku. Zpoždění paketu dosahovalo naměřené hodnoty 4ms, tedy 2/5 rozlišovací jednotky 0,01s. Pro účely výcviku je tato hodnota přijatelná, ne však pro možné použití při samotné soutěži. Největším problémem zde byla kolize při zastavení obou časů v jeden časový okamžik. Druhý čas musel vždy počkat na odeslání prvního paketu, což znamenalo zpoždění 8ms, tedy téměř celou rozlišovací jednotku. Tento model komunikace se ukázal jako zcela nevhodný a proto právě zde dojde v novém návrhu k zásadní změně vedoucí k dosažení maximální spolehlivosti zařízení.

Provoz byl jinak vcelku bezproblémový a jen zřídka se stalo, že nedošlo k zastavení například jednoho z časů. Nemůžu však rozhodně spolehlivost označit za stoprocentní. Časomíra i přesto splnila svůj účel, především obstála v testu mobility a jednoduchosti obsluhy pro snadné a rychlé použití. Zařízení je v současné době používané k tréninkovým účelům soutěžních družstev SDH Tvrdonice.

2 NÁVRH NOVÉ SESTAVY

V následujících odstavcích jsou popsány veškeré požadavky na nové časoměrné zařízení s ohledem na vlastní zkušenosti z praktického provozu podobných systémů a analýzu z předešlé kapitoly. Součástí je také návrh jednotlivých komponent, potřebných pro měření, včetně samotné komunikace mezi jednotlivými jednotkami.

2.1 Požadavky na zařízení

Mobilita

Tento aspekt je nejdůležitější v celém návrhu zařízení. Systém by měl být lehce aplikovatelný a neměl by zdržovat dlouhou přípravou. Jsou tedy žádoucí malé rozměry, jednoduchost a právě použití bezdrátového přenosu dat. Pro dosažení maximální mobility je nutností vestavěný akumulátor včetně adekvátního nabíjecího obvodu.

Jednoduchost

Zařízení musí být uživatelsky přívětivé. Je nepřípustné použití prvků, které jsou složité pro manipulaci a ovládání.

Odolnost

Vzhledem k předpokládanému použití časomíry v terénu a častému transportu je odolnost zařízení také velmi důležitým faktorem. Vysoké nároky budou kladeny především na použité konektory pro připojení cílových prvků. Žádoucí je též použití vyššího stupně krytí IP, minimálně IP56, pro zajištění odolnosti proti vodě a prachu.

Univerzálnost

Systém by měl být univerzální, co se týče možnosti připojení cílových prvků. Vstupy jednotky, které budou připojeny na snímací členy, budou v přepínací variantě *sink/source*. Tedy umožní připojení jak pasivního, tak aktivního čidla. Výstup cílové jednotky bude kompatibilní se současnými dostupnými systémy měření.

Modularita

Celý systém bude navržen tak, aby bylo možné jej provozovat v minimální hardwarové konfiguraci, tedy použití pouze primární a sekundární jednotky. Umožní však také dodatečné rozšíření o další jednotky, ať už snímače cílových prvků či externí zobrazovače. V případě použití bezdrátového přenosu bude možné komunikovat s více jednotkami současně.

2.2 Komponenty

Pro splnění požadavků časoměrného systému je nutné sestrojit hlavní primární jednotku, zajišťující samotné měření času, a minimálně jednu sekundární jednotku, jejímž úkolem bude sběr dat z koncových prvků. Obě jednotky budou spolu komunikovat především pomocí bezdrátového přenosu dat.

2.2.1 Primární jednotka

Jedná se o hlavní prvek celého systému. Bude zajišťovat samotné měření času a zprostředkovat jej na alfanumerický LCD display. Ovládání bude voleno pomocí pětice tlačítek (dvě navigační, potvrzující, tlačítko pro návrat a vyvolání menu). Pomocí nich bude možné též ovládat časomíru v režimu stopky. Tedy manuální mód pro ruční měření.

Jednotka bude disponovat konektorem pro připojení spouštěcího zařízení, dále konektorem pro připojení koncových prvků, ať už přímou metodou, či vhodnou sběrnicí, a připojením externího displeje. Pro možné zpracování výsledků zde bude konektor se standardní sběrnicí pro připojení s PC. Konkrétně USB připojení, které bude současně použito pro dobíjení interního Li-ion akumulátoru.

2.2.2 Sekundární jednotka

Jejím hlavním úkolem bude zpracování dat z cílových prvků a předání informací primární jednotce. Právě zde je předpoklad použití stupně krytí nejméně IP56, které zajistí dostatečnou odolnost vůči prachu a tryskající vodě. Bude disponovat 4 vstupy z čidel včetně 4 výstupů pro externí signalizaci aktivace čidel. Jednotka bude taky umožňovat nastavení mezi aktivním a pasivním snímačem a platnou hranou na vstupu z čidla. Napájení jednotky bude nejméně 12V z důvodu kompatibility s externí signalizací. Zdroj bude součástí sekundární jednotky včetně vestavěného nabíjecího obvodu. Výstupem bude dále přímá signalizace uzemněním patřičného výstupu pro přímou drátovou variantu (kompatibilita se současnými systémy) a výstup na vhodnou standardní sběrnici.

2.2.3 Koncové prvky

Jako koncové prvky lze použít libovolný typ snímače s dvoustavovým výstupem. Typicky například optobrána, zaznamenávající protnutí cílové čáry závodníkem, zvukový či tlakový snímač pro spuštění měření pomocí startovací pistole. Dále pak jazýčkový kontakt nebo indukčnostní snímače, které jsou často použity pro detekci sražení terče v požárním útoku. (*obrázek 4*).

Obrázek 4-indukčnostní snímač [26]

V tomto případě je nutné správně ošetřit vstupy. V případě použití NPN indukčnostního čidla, je kvůli použité interní ochranné diodě hodnota při uzemnění přibližně 0,8V, což může vést k nesprávnému vyhodnocení stavu. Ochranná dioda* je zřetelná na *schématu 1*. Princip ošetření je popsán v kapitole s návrhem hardwaru.

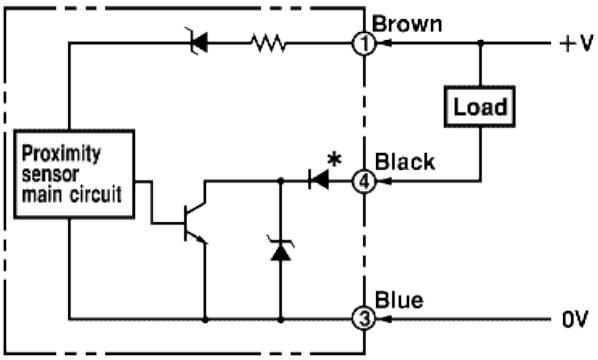


Schéma 1*-výstup indukčnostního snímače [2]*

2.2.4 Další možná rozšíření

Externí display

Display může být využit pro okamžitou informovanost diváků i samotných soutěžících o dosažených výsledcích. Systém bude komunikačně připraven pro toto budoucí rozšíření.

Obrázek 5*-příklad externího LED zobrazovače [3]*

Startovací zařízení

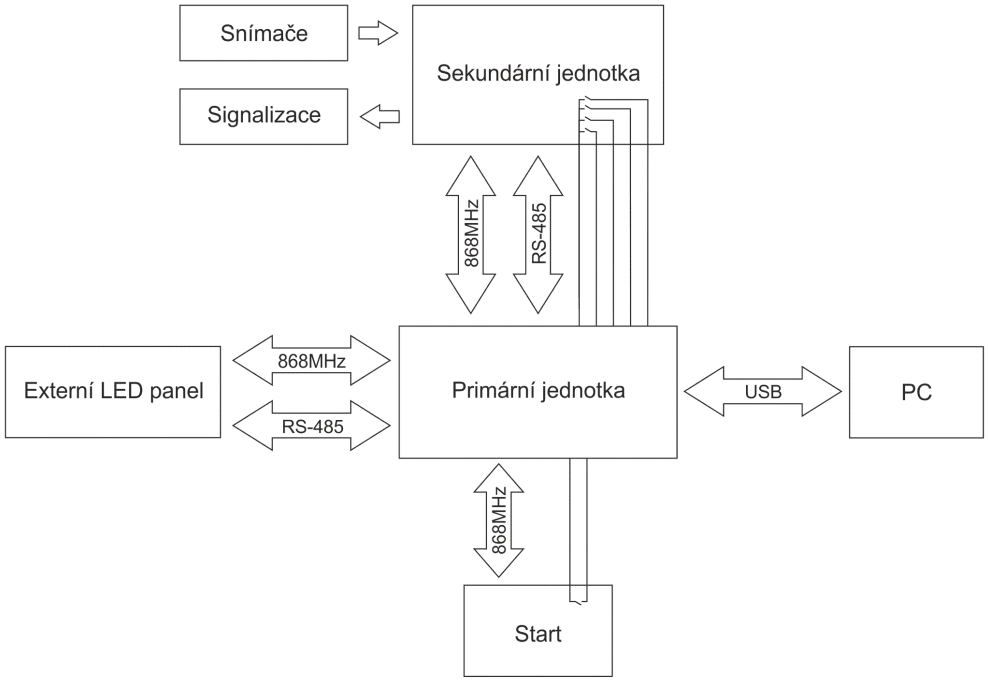
Díky použité bezdrátové technologii, se nabízí možnost dálkového spuštění měření a tím absolutní eliminace kabeláže. Systém bude připraven pro realizaci této varianty.

Dálkový ovladač

Bezdrátová komunikace také umožní použití dálkového ovladače například pro restart časomíry v okamžiku tzv. „ulitého“ startu, kdy závodník vykoná pohyb těsně před odstartováním. Soutěžící je pak obvykle zastaven a navrácen druhým výstřelem. V tuto chvíli však již časomíra běží a je nutné ji restartovat. Ovladač může sloužit i pro další různé vzdálené ovládání.

2.3 Vzájemná komunikace

Pro maximální modularitu a univerzálnost bylo zvoleno hned několika typů komunikace mezi jednotlivými prvky. Vedle primární bezdrátové komunikace na frekvenci 868MHz bude systém obsahovat také sériovou linku standardu RS-485 a pro dodržení kompatibility se současnými dostupnými systémy také přímou drátovou linku, která zajistí zastavení času po uzemnění patřičného signálního vodiče. Konkrétní komunikační systém bude plně nastavitelný uživatelem a umožní i různou kombinaci datových metod. Komunikační model zobrazuje *obrázek 5*.



***Obrázek 6**-komunikační model*

Ke spojení s PC pro možné zpracování naměřených výsledků byla, pro svou popularitu, zvolena sběrnice USB. Nejjednodušší variantou byla sběrnice standardu UART. Popularita této sběrnice pro komunikaci s periferiemi však v dnešní době značně upadá. Problémem je také absence této sériové linky na jakémkoliv modernějším počítači. Bylo by tedy nutné použít některého převodníku mezi standardem RS-232 a USB. To by bylo možné realizovat pomocí externího komerčního převodníku nebo použitím integrovaného obvodu zajišťujícím tento převod. Mezi tyto obvody se řadí asi nejznámější produkty firmy FTDI. Tato varianta však zvyšuje nároky na použitý hardware a díky stále častěji se objevujícímu vestavěnému USB modulu v samotných mikrokontrolérech, se jako nejjednodušší varianta jeví právě toto přímé připojení USB sběrnice.

2.3.1 Sériová sběrnice

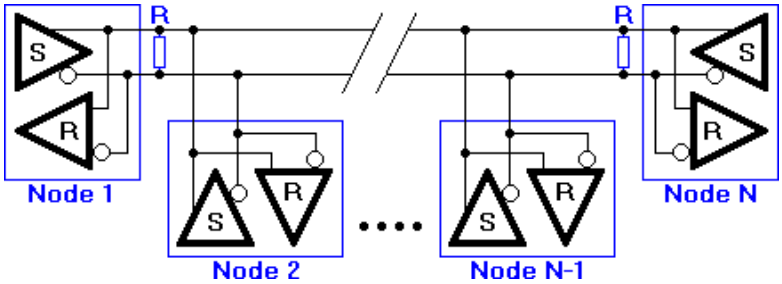
V případě volby kabelové komunikace mezi jednotkami, se nabízí uživateli možnost využití sériové linky, která přináší mnohé výhody oproti přímě kabelové variantě. Především redukuje nutný počet vodičů v případě měření většího počtu drah. Použití linky také teoreticky navyšuje počet měřených drah, oproti přímé metodě, která je omezena počtem vstupů primární jednotky, na počet omezený firmwarem systému. Další výhodou je možnost sběru dat ze sekundární jednotky. Může se jednat například o informace o stavu akumulátoru či připravenosti koncových čidel. Dalším důvodem volby sériové linky je možnost kabelového připojení externího LED zobrazovače.

Jako vhodná varianta se jeví použití standardu *ANSI/TIA/EIA-485* známým též pod označením *RS-485*. Tato sběrnice umožňuje, díky diferenčním signálům, redukci vodičů na pouhou dvojici a dovoluje přenášet data teoretickou rychlostí až 10Mb/s. Maximální provozní vzdálenost je 1200m. Takové výhody neposkytují jiné sběrnice, jako je například RS-232. Ta disponuje mnohem kratšími přenosovými vzdálenostmi a nižší rychlostí přenosu dat. RS-232 je přesto základem sběrnice RS-485. K převodu je nutné použít vhodný převodník například firmy *MAXIM*. Srovnání parametrů sběrnice RS-485 a RS-232 zobrazuje Tabulka1.

Tabulka 1*-souhrn parametrů sběrnice RS-485[4]*

	RS-485	RS-232
Přenos:	Half-duplex	Full-duplex
Signál:	Diferenční	Vztažený k zemnícímu vodiči
Topologie:	Multipoint	Point to point
Max. počet účastníků:	32	2
Vzdálenost:	1200m	15m
Rychlost (15m):	10 Mbps	20 kbps

Přestože sběrnice umožňuje připojení *multipoint*, tedy až 32 účastníků, použití této varianty se zde nepředpokládá. Důvodem je uživatelsky nepřívětivá realizace samotného propojení jednotlivých prvků, kde by musel být vodič, dle topologie, veden od jednoho sekundárního zařízení k dalšímu. Poslední jednotka by pak musela obsahovat terminační odpor pro omezení odrazů signálu. Tyto rutiny kladou již vysoké nároky na uživatele při obsluze a aplikaci časomíry v terénu. Sběrnice tedy bude řešena jako point-to-point. To také umožní zjednodušení komunikace a omezí kolize při přenosu dat. Kvůli omezení účastníků sběrnice na pouhé dva členy bude nutné zdvojit budiče sběrnice v primární jednotce. Důvodem je umožnění připojení současně jak cílové jednotky, tak externího LED zobrazovače. Nabízí se také jiná kombinace, vše již však závisí na firmwaru primární jednotky. Volba vysoké přenosové rychlosti umožní měření časů se zanedbatelným přenosovým zpožděním.



***Obrázek 7**-topologie RS-485[4]*

Topologii sběrnice RS-485 zobrazuje *obrázek 7*. Driver se skládá z vysílače a přijímače přičemž je možné oba prvky uvést do stavu vysoké impedance pro zajištění správné funkčnosti komunikace. Na začátku a na konci sběrnice jsou terminační odpory o hodnotě 120Ω. Celková impedance sběrnice je tedy 60Ω.

2.3.2 Bezdrátová komunikace

Jedná se o stěžejní způsob komunikace měřicího systému, které bude realizováno za použití komunikačního modulu pracujícího v bezlicenčním ISM pásmu. Tyto frekvence jsou určeny pro použití ve vědě, výzkumu, medicíně, zabezpečovací technice a spoustě dalších odvětví. Možné dostupné frekvenční pásma a povolené vysílací výkony se liší v závislosti na vyhláškách odlišných světových regionů, ale i konkrétních států. V České republice spravuje frekvenční pásma a určuje jejich využití Český telekomunikační úřad [9]. V Tabulce 2 jsou uvedeny některé frekvenční pásma přiřazené danému účelu na území našeho státu.

Bezdrátové moduly pro přenos dat jsou v našich podmínkách nejdostupnější ve verzi s nosnou frekvencí 433MHz a 868MHz nebo pro provoz Wifi a Bluetooth 2,4GHz. Variant je na trhu skutečně velká škála. Liší se mnoha různými specifikacemi ať už od použitého typu modulace (nejčastěji ASK, tedy amplitudové kódování, nebo

FSK – frekvenční kódování). Některé moduly nabízí i rozšířené možnosti v podobě využití technologie *frequency hopping.* Moduly často nabízí funkce dálkového spínání. Ty nejsou náročné na obsluhu a výsledná aplikace je tedy velmi jednoduchá. Naproti tomu jsou na trhu moduly, které nabízí široké nastavení parametrů a umožňují přenos libovolných dat. Způsob komunikace je tedy převážně na samotném uživateli.

Tabulka 2*-přehled dostupných frekvenčních pásem na území ČR [5]*

Frekvence	**Provoz**
27 MHz	Provozování je možné podle VO-R/10/04.2012-7.
433 MHz	Provozování je možné podle VO-R/10/04.2012-7 (pouze přenos dat; bezdrátová sluchátka nejsou povolena).
470 − 789 MHz	Provozování bezdrátových mikrofonů je možné podle VO-R/10/04.2012-7.
823 – 832 MHz	
863 – 865 MHz	Provozování akustických aplikací je možné podle VO-R/10/04.2012-7.
868 – 870 MHz	Provozování je možné podle VO-R/10/04.2012-7.
870 – 960 MHz	Pásmo provozu mobilních telefonů (GSM) – provozování jiných aplikací není přípustné.
1,785−1,8 GHz	Nové pásmo uvolněné podle VO-R/10/04.2012-7 pro bezdrátové mikrofony.
2,4 GHz	Provozování (RLAN, RFID, zařízení krátkého dosahu) je možné podle VO-R/12/09.2010-12 nebo VO-R/10/04.2012-7.

2.3.3 Eliminace zpoždění přenosu

Největším problémem první verze časomíry, stejně tak na trhu dostupných modelů nebo i další studentské práce na podobné téma [6], je časová závislost bezdrátového přenosu na okamžiku indikace cílového snímače. V případě působení poruchy na bezdrátový přenos nedojde k doručení informace a zastavení měření a případné další odeslání paketu již zavádí nepřípustné časové zpoždění způsobené samotnou komunikací. Elegantním řešením tohoto problému je časová synchronizace mezi komponenty. V primární jednotce poběží hodiny reálného času s rozlišením minimálně 0,01s. Tento čas bude dále distribuován a synchronizován se sekundárními jednotkami. V okamžiku startu se do paměti mikroprocesoru zapíše pouze aktuální reální čas t_1 začátku měření a nezávisle na sobě si sekundární jednotka zapíše do paměti hodnotu reálného času konce měření t_2. Odeslání těchto dat primární jednotce se již

nestává časově závislým a je možné je bez problémů opětovně přeposlat v případě poškození paketu způsobeného ať už kolizí vyslaných rámců nebo rušení z cizího zdroje. Primární jednotka pak jen provede přepočet časů a výsledek zobrazí na LCD display. Výsledný čas je roven následujícímu vztahu (1).

$$t = t_2 - t_1 \tag{1}$$

2.3.4 Základní model bezdrátové komunikace

Základní model této komunikace počítá s připojení pouze dvou zařízení. Jedné primární a jedné sekundární jednotky. Díky tomu nebude komunikace příliš členitá, bude rychlá a spolehlivá. Data, které si jednotky budou vyměňovat, budou pouze časová razítka pro zajištění základní funkčnosti, popřípadě zpráva o stavu akumulátoru sekundární jednotky.

2.3.5 Rozšířený model bezdrátové komunikace

Bezdrátové spojení umožňuje teoreticky připojení neomezeného počtu zařízení pro sběr dat z různých míst sportoviště. Toto řešení umožní taky například zaznamenávání mezičasů. Taková je podoba rozšířeného komunikačního modelu, pro který bude systém hardwarově připraven.

Primární jednotka si uloží do své paměti informaci o ostatních sekundárních jednotkách. Pro zjednodušení nebude nutné tuto konfiguraci provádět při každém spuštění. Poslední nastavení bude uchováno v paměti a použito při následujícím zapnutí měřicího systému. Konfiguraci zahájí uživatel vyhledáním dostupných jednotek. Dojde k vyslání paketu, vyzývajícího všechny sekundární jednotky v dosahu k odpovědi. Aby nedošlo k odeslání všech odpovědí najednou, vygeneruje si každá sekundární jednotka náhodný okamžik odeslání odpovědi. Čas nebude zcela náhodný, ale bude rozdělen do definovaných časových slotů o dostatečné velikosti i pro potvrzení doručení odpovědi. Primární jednotka stanoví maximální čas, do něhož můžou sekundární jednotky odpovědět. V případě kolize dojde k vygenerování nového náhodného okamžiku a opětovnému odeslání odpovědi. Detekce kolize bude řešena absencí potvrzení o doručení, které zašle konkrétní sekundární jednotce primární jednotka. Odpověď sekundární jednotky bude obsahovat:

- Unikátní identifikátor
- Typ jednotky
- Stav jednotky
- Počet vstupů

Unikátní identifikátor bude sloužit k přesnému určení sekundární jednotky. Jeho velikost bude 16bitů, což umožní vytvořit až 65 536 zařízení. Identifikátor bude zřetelně

uveden na každém zařízení. Při komunikaci s konkrétní jednotkou bude hlavička paketu obsahovat právě tento identifikátor. Způsob komunikace bude tedy selektivní. Paket přijmou všechny stanice. Zpracuje jej však pouze ta, pro niž je zpráva určena.

Typ jednotky bude udávat, zda se jedná o sekundární jednotku v podobě snímače cílových prvků, nebo zda se jedná o externí LED zobrazovač. Pro tuto informaci bude vyčleněn celý byte.

Stav jednotky bude obsahovat údaje o napájení a především informaci o obsazenosti jednotky. Pokud by již byla synchronizována s jinou primární jednotkou, nebude možné tuto jednotku přiřadit.

Informaci o počtu vstupů zašle pouze sekundární jednotka se sběrem dat z koncových snímačů. Bude možné vytvořit jednotku s různým počtem vstupů v závislosti na použitém firmwaru.

Z těchto informací si uživatel vybere konkrétní jednotky v dosahu a jejich vstupy přiřadí konkrétním časům pro měření. Pro bezdrátové spuštění měření bude též možné přiřadit vzdálený vstup začátku měření. Obdobně bude uživatel postupovat při přiřazení externího zobrazovače, což umožní zobrazovat více výsledků současně popřípadě stejný výsledek na více zobrazovačích. Řídicí jednotka bude již automaticky udržovat pravidelnou časovou synchronizaci se všemi sekundárními jednotkami.

2.3.6 Detekce kolize

Pro správnou a spolehlivou funkčnost systému je nutné detekovat kolize a chybové stavy komunikace a učinit patřičné kroky k opravě této poruchy. Veškeré přijetí datové zprávy bude následováno odpovědí obsahující informaci o správném doručení. Pokud zdroj informace tuto zprávu neobdrží, pravděpodobně došlo k poškození a zahození zprávy. Aby nedošlo k opětovnému okamžitému odeslání paketu a tím dalšímu výskytu rizika nové kolize, jelikož jiný vysílač učiní stejné kroky, vygeneruje si jednotka náhodný čas, po jehož uplynutí se pokusí o nový přenos informace. Jednotka také nezačne vysílat v okamžiku, kdy detekovala přenos mezi jinou jednotkou. Po této detekci dojde opět k nastavení náhodně generovaného času s minimální délkou pro umožnění přijetí potvrzující zprávy. Konkrétní časování bude předmětem fyzického testování bezdrátového přenosu.

2.3.7 Časová synchronizace

Pro přesné měření za použití bezdrátového přenosu je nutné s velkou přesností synchronizovat interní hodiny všech jednotek. Kvůli zpoždění během samotného přenosu nestačí pouze zaslání informace o reálném čase v primární jednotce. Je nutné provést měření doby samotného přenosu a použít adekvátní kalibrace. Tuto rutinu lze automatizovat použitím synchronizace založené na standardu *IEEE1588* [7].

Protokol se taky někdy označuje jako *PTP* (*precision time protocol*). Model synchronizace zobrazuje *obrázek 8*. Správná synchronizace předpokládá konstantní dobu zpoždění v přenosu. Časové otisky je tedy nutné vytvářet až v okamžiku odesílání samotného paketu.

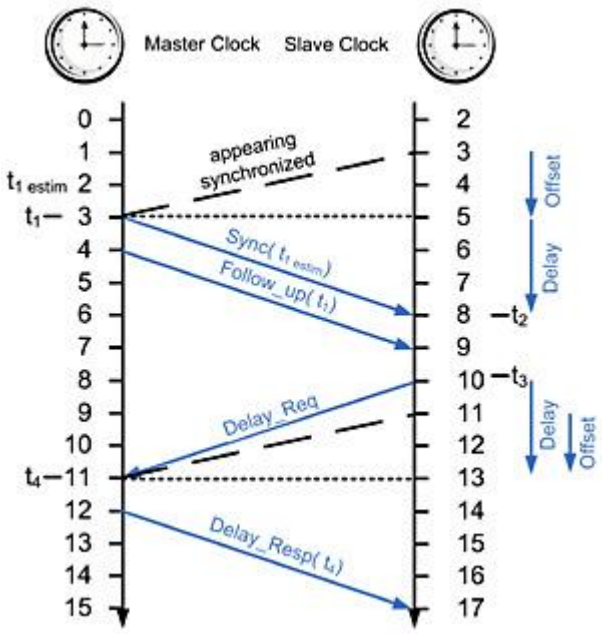
Samotný průběh synchronizace je následující:

- Jednotka master odešle jednotce slave svůj aktuální čas t_1
- Tuto hodnotu si slave uloží a současně vytvoří otisk svého vlastního času t_2.
- Následuje zpětný dotaz jednotky slave přičemž v okamžik odeslání si vytvoří otisk t_3
- Jednotka master odpovídá hodnotou času t_4 zaznamenaného v okamžiku doručení zprávy.

Z těchto hodnot časů $t_{1\text{-}4}$ je slave jednotka schopna dopočítat podle vzorce (2) offset a nastavit správný čas dopočtením dle (3).

$$t_{offset} = \frac{(t_2 - t_1) - (t_4 - t_3)}{2} \tag{2}$$

$$t_{real} = t - t_{offset1} \tag{3}$$



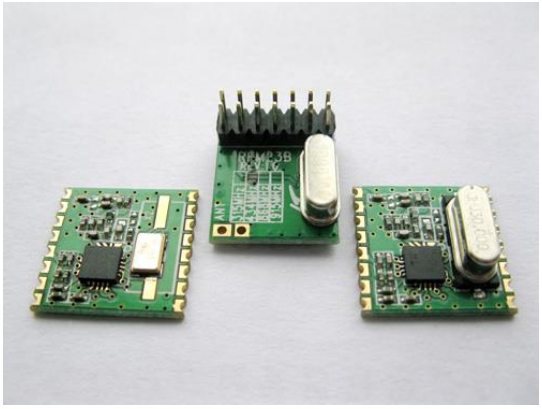
Obrázek 8*-časová synchronizace dle PTP [7]*

2.3.8 Bezdrátový modul

Pro samotný bezdrátový přenos byly, po zkušenosti z první varianty časomíry, opět zvoleny moduly firmy *HOPE Microelectronic, tentokrát model RFM23B (obrázek 9)* s nosnou frekvencí v pásmu 868MHz a FSK modulací. Vnitřní zapojení modulu s použitým čipem RF23B je zobrazeno na *obrázku 11*.

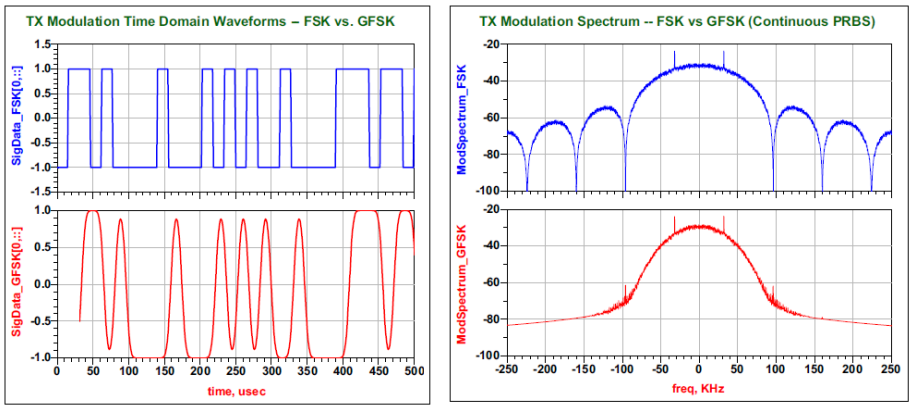
Druhé dostupné bezlicenční pásmo na frekvenci 433MHz nebylo zvoleno z důvodu častého použití pro domovní bezdrátové zvonky, které by se mohli stát zdrojem rušení komunikace časomíry. Dalším důvodem je možnost použití kratší antény, což redukuje rozměry jednotlivých komponent. Délka antény je závislá na vlnové délce. Nejčastější jednoduché prutové antény se používají v délce $\lambda/2$ nebo $\lambda/4$, přičemž λ se označuje vlnovou délku elektromagnetické vlny.

Moduly jsou typu transceiver, tedy obsahují modulátor i demodulátor a umožňují tak přenos dat v režimu half-duplex. Mezi jednotlivými režimy může uživatel libovolně přepínat. Napájecí napětí modulu je maximálně 3.6V. Odebíraný proud při vysílání dat nepřesahuje hodnotu 30mA.



Obrázek 9*-bezdrátové moduly RFM23B [12]*

Typ modulace *FSK* byl zvolen pro svoji vyšší spolehlivost oproti amplitudovému kódování [11]. RFM23B navíc disponuje i modulací *GFSK*, což je alternativa běžné *FSK* modulace. Obsahuje navíc Gaussův filtr, který omezuje intenzitu nežádoucích postranních pásem vznikajících při standardní FSK modulaci. Rozdíl mezi těmito modulacemi zobrazují grafy na *obrázku 10*, vyjmutém z dokumentace modulu [12]. Horní polovina ukazuje použití *FSK* a viditelné postranní pásma okolo nosné frekvence, naproti tomu *GFSK* (dole) s výrazně potlačenými postranními pásmy.

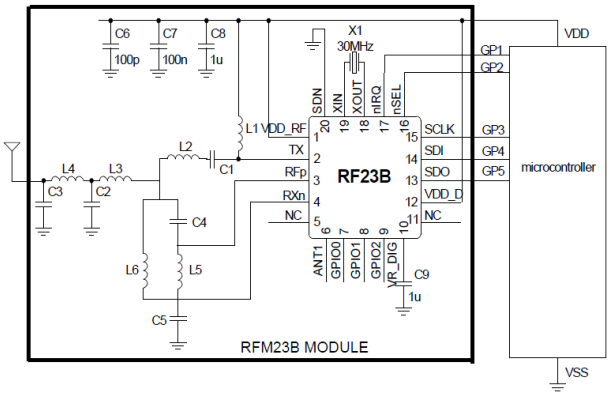


***Obrázek 10**-rozdíl mezi FSK a GFSK [12]*

ASK (Amplitde-shift keying) modulaci nabízí svými produkty například firma *Aurel*. Tyto moduly jsou však značně jednoduché. Neobsahují žádný interface pro správu odesílaných dat ani neumožňují širší nastavení. V tomto ohledu mají bezdrátové moduly firmy *HOPE Microelectronic* velkou výhodu. Velmi příznivá je též jejich pořizovací cena.

Zvolené moduly RFM23B disponují oproti modulům RFM12B, použitých v první verzi časomíry, větším vysílacím výkonem, který výrobce udává až 13dBm (20mW), dále lepší citlivostí -121dBm oproti -113dBm u původního modulu a širší uživatelskou nastavitelností.

Komunikace s modulem probíhá na sběrnici SPI, jejíž specifikace jsou popsány v dokumentaci produktu [12]. K připojení modulu je zapotřebí v minimální konfiguraci pouze 5 vodičů a to SDO a SDI, které zprostředkují samotný přenos dat po sběrnici, signál SCK, který obsahuje časovou synchronizaci dat v přenosu a signál nSEL, který udává, s jakým slave zařízením na sběrnici chce master komunikovat. Posledním pátým, nepovinným signálem, je nIRQ, který slouží jako indikace přerušením z nastaveného vnitřního stavu modulu. Je velmi výhodné tento pin připojit k mikrokontroléru. Signalizuje například přijetí validních dat či jiné důležité stavy modulu. Odpadá tedy nutnost pravidelného dotazování se na modul, zda nemá ve svém vnitřním zásobníku uložena nějaká data po bezdrátovém přijetí. Konfigurace je zřetelná z *obrázku 11*.



***Obrázek 11**-konfigurace připojení RFM23B [12]*

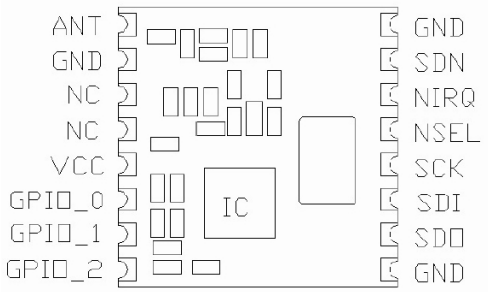
Velkou výhodou modulů firmy *HOPE microelectronic* je možnost použití synchronizačního klíče v přenosu. Velikost tohoto klíče je nastavitelná od 2 do 4 byte. Při zahájení komunikace je nutné nejprve odeslat tento synchronizační klíč, který slouží pro základní filtraci odeslaných dat. Modul si do své interní paměti začne ukládat přijatá data až po detekci tohoto klíče. Tato filtrace tedy odpadá samotnému mikrokontroléru a šetří tím jeho vytížení při možném příjmu rušení. Moduly RFM23B navíc obsahují funkci *Packet Handler*, která automaticky k odesílaným datům tento synchronizační klíč přiloží. Není tedy nutné přikládat klíč při přípravě paketu v MCU. Funkce umí automaticky ke zprávě přiložit také kontrolní součet CRC. Uživatel tedy může modulu předat pouze data k odeslání. O zbytek se již postará samotný bezdrátový modul. Funkce je aktivní také při přijetí zprávy. Dokáže detekovat synchronizační klíč, kontrolní součet, případně speciální hlavičku paketu a do zásobníku uloží pouze čistá data bez přibalených bytů. Typickou podobu odeslaného paketu zobrazuje *obrázek 12*. Na prvním místě zde dominuje položka *Preamble*. Jedná se o nutnou část zprávy, kterou detekuje bezdrátový modul a připravuje ho k přijetí dat. Skládá se z hodnoty 0x55, tedy střídající se logická nula a jednička.

***Obrázek 12** - Komunikační paket bezdrátového modulu[12]*

K samotnému odeslání dat modulem slouží několik módů. Modul je schopen komunikovat i v přímém vysílacím módu přičemž je vstup modulátoru / výstup demodulátoru přímo připojen k pinu modulu a veškeré časování, respektive rychlost přenosu, ponechává na řízení z MCU. Jinou, výhodnější variantou, je použití interního příjímacího (RX) a vysílacího (TX) zásobníku, každém o velikosti 64bytů. MCU pouze

nastaví parametry přenosu, zapíše data do interního zásobníku a pošle požadavek k vysílání zapsaných dat. V okamžiku odeslání paketu dojde k vygenerování přerušení, informujícím MCU o možnosti odeslání dalších dat. V případě příjmu jsou data do zásobníku automaticky ukládána a po jeho naplnění je jednotka MCU vyrozuměna opět pomocí pinu přerušení nIRQ a data vyzvednuta linkou SPI. Indikaci přijetí pomocí přerušení vykonat také funkce *Packet Handler*, která do zásobníku naskládá přijatá, rozbalená data.

Připojení jednotlivých pinů a jejich význam je vysvětlen v tabulce 4. Fyzické rozměry modulu jsou 16x16mm. Na trhu jsou dostupné jak ve verzi s připojením pomocí kolíkové lišty, ovšem s netypickou roztečí 2mm, nebo ve verzi SMD (*obrázek 13*).



***Obrázek 13**-fyzické rozložení RFM23B [12]*

***Tabulka 3**-význam pinů modulu RFM23B*

Název pinu	**Funkce**	**Směr**
VCC	Napájení (1.8V až 3.6V)	S
GND	referenční zem	S
GPIO 0-3	Programovatelné rozšiřující porty	I/O
SDO	Data - SPI	O
SDI	Data - SPI	I
SCLK	Zdroj hodin - SPI	I
nSEL	Výběr slave (aktivní log. 0)	I
nIRQ	Výstup přerušení (aktivní log. 0)	O
SDN	0 - > modul aktivní, 1 - > modul vypnutý	I
ANT	Anténní výstup	O
S -> napájení; I - > vstup; O -> výstup		

Modul disponuje velkou škálou přídavných funkcí určené pro nejrůznější aplikace. Jeho součástí je například i teplotní senzor, rozšiřující vstupně/výstupní port pro připojení tlačítek popřípadě signalizace pomocí LED, wake-up timer sloužící pro zařízení s pravidelným sběrem dat a spousta dalších. Většina těchto funkcí v aplikaci systému bezdrátové časomíry nebude použita.

3 NÁVRH HARDWARU

Návrh hardwarových komponent zahrnuje volbu samotných mikrokontrolérů pro primární i sekundární jednotku, jejich zapojení, oscilaci a nutné ošetření vstupů. Součástí je také návrh napájení obou jednotek včetně adekvátních nabíjecích obvodů pro zvolené akumulátory.

3.1 Primární jednotka

Úkolem této jednotky bude samotné měření a celková koordinace systému. Bude obsahovat vstupy 5 tlačítek, 4 vstupy pro připojení cílových prvků a jeden vstup pro startovací mikrofon. Výstup bude řešen na LCD display o velikosti 4x20 znaků. Verze displeje byla zvolena s napájecím napětím pro 3.3V s podsvícením.

3.1.1 Mikrokontrolér

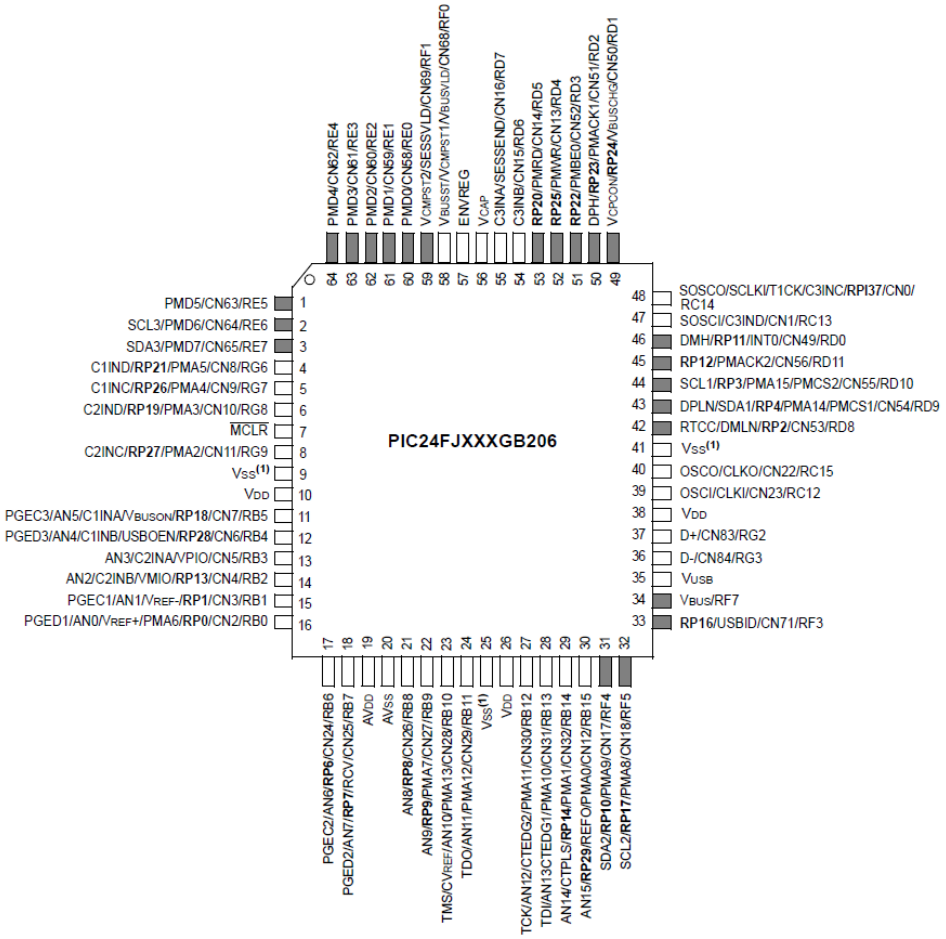
Pro primární jednotku byl zvolen mikrokontrolér z 16 bitové rodiny výrobce *Microchip PIC24FJ256GB206* [2]. Tento mikroprocesor disponuje dostatečným počtem vstupně-výstupních pinů pro připojení všech periferií a širokou nabídkou jednotlivých modulů, vhodných pro sestavení této jednotky. Jedná se například o USB modul, umožňující připojení MCU s PC, real-time modul, který zajistí udržení skutečného reálného času i při vypnutí jednotky, A/D převodník, pomocí kterého lze monitorovat stav akumulátoru a další. Výčet jeho parametrů je uveden v tabulce 4.

***Tabulka 4**-přehled parametrů MCU primární jednotky [2]*

Funkce/vlastnost	**Hodnota**
Operační frekvence	32MHz
Programová paměť	256kB
Datová paměť	96kB
Počet zdrojů přerušení	65
Porty	B, C, D, E, F, G
Celkový počet I/O pinů	52
Přemapovatelné piny	29 pinů
Časovače (16 bitů)	5
Přerušení při změně stavu na pinu	52
UART moduly	4
SPI moduly	3
I^2C moduly	3
Počet analogových kanálů	16

Velkou výhodou MCU z řady PIC24FJ je možnost připojit výstup libovolné periferie, jakou jsou například výstupy UART modulu, na libovolný přemapovatelný pin mikrokontroléru. Tato vlastnost usnadňuje návrh desky plošných spojů, jelikož není nutné optimalizovat návrh vůči konkrétním pinům. Samotné přiřazení proběhne až v rámci firmwaru.

Mikrokontrolér je dostupný v pouzdrech *QFN-64* a *TQFP-64*. Celkový počet vývodů je tedy 64 pinů. Jejich rozmístění a funkce jsou znázorněny v *obrázku 14*.



***Obrázek 14**-rozložení pinů MCU primární jednotky [2]*

Napájecí napětí MCU je 3,3V. Samotné jádro však pracuje s napětím pouze 1,8V. Pro jeho stabilizaci je v samotném pouzdru umístěn stabilizátor napětí. MCU umožňuje připojení dvojice oscilačních krystalů. K programování jsou určeny tři sady různě umístněných pinů sloužících k připojení *ICSP* programátoru *(in circuit serial programming)*, umožňujícího programování MCU přímo v zapojení. Mikrokontrolér obsahuje také *JTAG boundary scan (Joint Test Action Group)*. Jedná se o standard, který dovoluje sledování výstupních hodnot pinů, či jiných vnitřních stavů integrovaného obvodu, pomocí sběrnice a tedy bez nutnosti fyzického měření.

3.1.2 Vstupní modul

Pro ochranu samotného mikrokontroléru a zajištění správné funkce vstupů do primární jednotky bylo nutné navrhnout adekvátní ochranný obvod. Jednou z variant jak toto ošetření realizovat je použití optočlenů. Tato varianta je však obtížně realizovatelná v kombinaci s použitým napájením z Li-ion akumulátoru. Z důvodu kompatibility s jiným měřicím systémem také nelze diodu rozsvítit použitím aktivního čidla, které by již disponovalo dostatečným napájecím napětím. Požadavkem na tyto vstupy byla jejich aktivace při uzemnění (pasivní čidlo). Optočlen je tedy v tomto případě nutné napájet z interního zdroje. Pro správnou funkčnost optočlenu v takovém případě by bylo nutné oddělit napájecí větve optočlenu od zbytku obvodu další stabilizací, která by byla současně dostatečně robustní a odolní před případnými nežádoucími stavy na vstupu optočlenu. Vzhledem k rozsahu napětí na Li-ion akumulátoru bychom museli počítat po lineární stabilizaci s napětím přibližně 2V pro napájení LED. Je nutné brát v potaz, že prahové napětí IR diody v optočlenu je přibližně 1,1V. Zbývá tedy velmi malý rozsah na omezení proudu odporem. Větší problém nastává při připojení zmíněného indukčnostního snímače s ochranou diodou. Zde vnikne další úbytek napětí 0,8V. Existuje tak velké riziko, že nedojde k rozsvícení IR LED a indikace zastavení času. Nelze taky opomenout možné použití až 100m vodiče ke koncovému prvku, což dohromady odpovídá 200m vzdálenosti. Úbytek na tomto vodiči, díky relativně velkému proudu do IR LED, by též mohl způsobovat potíže.

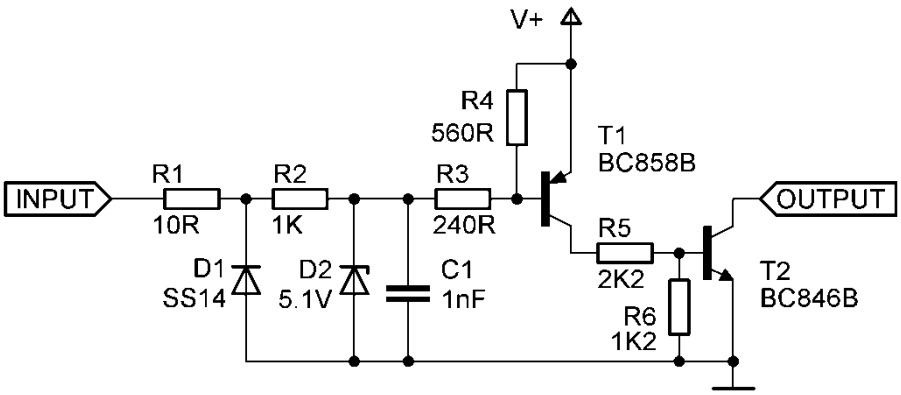


***Schéma 2**-vstupní obvod primární jednotky*

Jinou variantou je ošetření vstupu pomocí schottkyho diody a zenerovy diody [14]. Návrh tohoto obvodu je znázorněn na schématu 2. Schottkyho dioda D1 zkratuje případné přivedené záporné napětí vůči referenčnímu vodiči, kdežto zenerova dioda D2 způsobí omezení případného velkého kladného napětí. Pro filtraci případného šumu vznikajícím na velmi dlouhém vedení je zapojení doplněno o filtrační kondenzátor C1 o hodnotě 1nF. Pro zajištění spuštění uzemněním bylo zvoleno zapojení PNP a NPN tranzistorů T1 a T2. Výstup tohoto obvodu bude přímo připojen ke vstupnímu portu MCU. Výstup je řešen s otevřeným kolektorem. Pro definici napětí v klidovém stavu je

využito interního pull-up rezistoru v samotném mikrokontroléru. Primární jednotka bude celkem obsahovat 5 těchto vstupních ochran. Schéma celého modulu a deska plošného spoje je uvedena v příloze 7 a 8.

3.1.3 Návrh obvodu s MCU

Kompletní návrh zapojení primární jednotky je uveden v příloze 1. Deska plošného spoje byla zvolena díky složitosti zapojení jak oboustranná. Její návrh zobrazuje příloha 2.

Obvod obsahuje tři hlavní napájecí větve oddělené tranzistory T2, T3, T4 a T5. Vstupní napětí je 5V, které bylo zvoleno pro umožnění rozsvícení LED podsvícení displeje. Zbylé dvě větve mají hodnotu 3,3V, z nichž jedna je sepnuta neustále pro napájení samotného MCU z důvodu možného využití *SLEEP* režimu pro zachování obsahu paměti a umožnění čítání reálného času i v tomto úsporném módu. Druhá větev je spínána *MOSFET* tranzistorem, ke kterému jsou připojeny veškeré periferie nepotřebné při přechodu do *SLEEP* režimu. Napětí 3,3V je stabilizováno obvodem MCP1700 [20], který má velmi nízký samoodběrný proud o hodnotě pouhé 1,6μA.

Integrované obvody IC2 a IC4 jsou budiče linky RS-485 od firmy Maxim v provedení pro napájení 3,3V [15]. Jedná se o obvody MAX3485. Na jejich výstupy je připojen 120Ω terminační odpor.

Konektor *SV1* a *SV2* připojené k portu D slouží pro připojení tlačítek (příloha 3, 4) a vstupů z koncových prvků. Na vstupech portů nejsou připojeny externí pull-up rezistory. Těmi totiž disponují vstupy samotného mikrokontroléru a lze je dle potřeby aktivovat v obslužném firmwaru. Další vstupy jsou přivedeny k portu B. Ty slouží ke sledování stavu nabíjecího obvodu Li-ion. Je využit také jeden analogový vstup na portu B pinu 7. Přes odporový dělič a tranzistorové oddělení T6 a T7 zde bude MCU sledovat napětí na akumulátoru a informovat tak uživatele o stavu tohoto zdroje energie. Odpojení bylo nutné aplikovat z důvodu omezení odebíraného proudu ve *SLEEP* režimu. K programování MCU slouží ICSP připojení na CON1 k portu B. Dalším vstupem je spínač připojený na RB6. Bude sloužit jako hlavní spínač primární jednotky.

USB zapojení bylo navrženo podle doporučeného připojení v katalogovém listu mikrokontroléru [2].

LCD display je připojen 4 bitovou paralelní sběrnicí k portu E. Řadič LCD je kompatibilní se známým typem od výrobce *Hitachi* (*HD44780*). Trimer R6 slouží pro nastavení napětí pro zobrazování samotného LCD. Z důvodu použití napájení pouhých 3,3V bylo nutné zvolit display s podporou tohoto nízkého napětí. LCD obsahuje měnič pro záporné napětí, které je vyvedeno na pinu běžně sloužícího pro připojení anody podsvícení. Toto napětí slouží jako reference pro samotný zobrazovač. Trimer je tak připojen jako dělič mezi toto záporné napětí a samotné napájení. Podsvícení displeje je

připojeno k 5V napájecí větvi a je spínáno tranzistorem T1 z pinu RD2. Na tento pin lze přivést také výstup PWM modulu a aktivně tak řídit jas podsvícení displeje.

Na SPI sběrnici je k portu B a F připojen bezdrátový modul RFM23B [12]. Na pinu RB11 je z modulu přivedeno přerušení.

V obvodu je na stejnou SPI připojena také SD karta. Předpoklad jejího použití je především pro možné odladění firmwaru. Umožní velkoobjemový sběr dat vnitřních stavů systému. Její použití však nabízí i možnost zálohování naměřených výsledků.

3.1.4 Generátor hodinového signálu

Pro oscilaci samotného mikrokontroléru byl zvolen precizní krystal o frekvenci 4MHz. Mikrokontrolér obsahuje ve svém pouzdru také *PLL* násobičku *(Phase-Locked Loop)*. Jedná se o fázový závěs, který lze v případě nutnosti aktivovat a taktovat tak procesor na vyšší kmitočet. Základní takt krystalu byl zvolen s ohledem na snazší fyzickou realizovatelnost při návrhu desky plošných spojů.

Obvod bude obsahovat ještě sekundární krystal o frekvenci 32,768kHz. Tento krystal bude sloužit pro blok reálného času, který bude zajišťovat udržení skutečného času po dobu vypnutí jednotky. K samotnému měření bude využit primární krystal na frekvenci 4MHz. Lze tak dosáhnout lepšího rozlišení při měření.

3.1.5 Napájecí modul

Vzhledem k použitému akumulátoru Li-ion nastal v napájení problém se stabilizací napětí pro logické obvody a mikrokontrolér. Rozsah napětí akumulátoru se pohybuje od úplného vybití po nabíjení od 2,5 do 4,1V. Žádané napětí pro napájení obvodu je však 3,3V. Pro stabilizaci takovéhoto napětí se nabízelo několik variant. První bylo použití *buck-boost* měnič, například *LTC3441* výrobce *Linear technology [16]*. Ten umožňuje zvýšení či snížení vstupního napětí na žádanou hodnotu 3,3V. Disponuje taky funkcí *Burst Mode*, která snižuje spotřebu samotného měniče a dodává pouze potřebnou energii pro udržení napájeného obvodu. Tento režim by byl využit pro snížení spotřeby ve *SLEEP* režimu. Obvod je však poměrně složitý a vyžaduje řízení *Burst* módu. Další komplikací byla dostupnost pouze v *DFN* pouzdru, které je nutné pájet horkým vzduchem a také vysoká pořizovací cena, která se pohybovala okolo 140Kč. Konečnou variantou bylo řešení pomocí step-up měniče MCP1640 [21]. Ten zvedá napětí z baterie na 5V, které tak umožnilo připojení podsvícení LCD displeje. Důležitá byla také velikost samoodběrového proudu. Obvod MCP1640 se při detekci nízkého odběru přepíná automaticky do režimu, kdy stále pracuje, ovšem sám odebírá minimální proud a to pouhých 19uA. Při detekci většího odběru se obvod opět přepíná zpět. Výstupní napětí je možné nastavit a to pomocí děliče R2, R3 a R4. Jelikož je dělič

stále připojen na napájení, jsou jeho hodnoty voleny co možná největší. Konkrétní odpory lze vypočítat ze vztahu (4).

$$R_{top} = R_{Bot} \times \left(\frac{V_{out}}{V_{fb}} - 1\right) \tag{4}$$

R_{top} – horní odpor děliče
R_{bot} – dolní odpor děliče
V_{out} – žádané výstupní napětí
V_{fb} – referenční napětí (dle katalogu 1.21V)

Součástí návrhu obvodu napájení je i samotné nabíjení akumulátoru typu Li-ion. Na trhu je skutečně velká škála obvodů sloužících pro nabíjení těchto článků. Mezi zajímavé obvody se řadí například BQ24070 [17], který obsahuje kromě obvodu dohledu akumulátoru i obvod pro řízení napájení. Pokud má obvod dostatečné napájecí napětí na vstupu, připojuje napájený systém přímo k tomuto zdroji, pokud ne, je jako hlavní zdroj použit právě akumulátor. Nevýhodou je však složitá režie. Je nutné vyčlenit na MCU spoustu pinů pro řízení, případně pro sledování stavu obvodu. Další velkou nevýhodou je použité QFN pouzdro a relativně vysoká cena pohybujících se okolo 70Kč.

Jako levnější varianta se nabízí jeden ze základních nabíjecích obvodů, například MCP73831 [22]. Ten disponuje pouze jediným výstupem signalizujícím stav nabíjení. Konečnou zvolenou variantou je obvod MCP73837 [23]. Výhodou tohoto obvodu jsou dva napájecí vstupy. Jeden napájecí z USB, pro který je možné nastavit jeden ze dvou standardních nabíjecích proudů z USB portu. V této aplikaci byla nastavena vyšší hodnota, tedy 500mA. Druhý vstup je použit pro připojení externího adaptéru s napětím 5V. Zde je nabíjecí proud nastaven až na 1A. Signalizace stavu nabíjení je zde řešena dvěma výstupy s otevřeným kolektorem.

Schéma zapojení je uvedeno v příloze 5. Deska plošného spoje pak v příloze 6. Návrh obvodu předpokládá nižší odběrový proud než proud nabíjecí. Pokud bude akumulátor dobíjen a současně bude primární jednotka spuštěna, bude nabíjecí proud o odběrový menší.

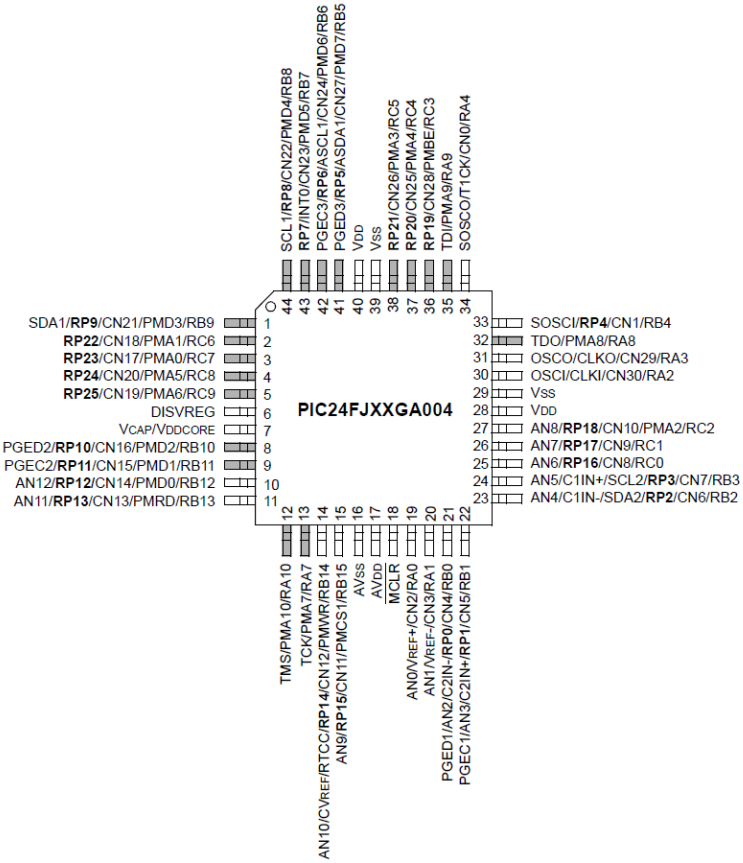
Modul napájení je opatřen navíc spínačem S1, který po zmáčknutí uzemní spouštěcí pin zvyšujícího měniče a odpojí tak napájení. Bude tedy sloužit pro případný restart primární jednotky.

3.2 Sekundární jednotka

Její úlohou bude sběr dat z koncových prvků a předání informací primární jednotce. Toto zařízení bude disponovat 4 univerzálními vstupy z čidel, 4 výstupy pro externí světelnou či zvukovou signalizaci, 4 výstupy pro přímou komunikaci s primární jednotkou, jednou sériovou sběrnicí RS-485 a bezdrátovým modulem. Napájení bude řešeno malým olověným akumulátorem s napětím 12V.

3.2.1 Mikrokontrolér

Vhodným mikrokontrolérem pro sekundární jednotku je například PIC24FJ64GA004, tedy také MCU z 16 bitové rodiny výrobce Microchip [18]. Ten disponuje 3 porty a celkovým počtem 35 vstupně výstupních pinů. Jejich význam je znázorněn v *obrázku 15*. Vlastnosti jsou celkově podobné mikrokontroléru popsaného v kapitole primární jednotky. Tento mikrokontrolér však disponuje menší programovou pamětí (64kB) a nižším počtem pinů. Parametry jsou však dostatečné.



***Obrázek 15**-význam pinů MCU PIC24FJ64GA004 [18]*

Pro taktování tohoto MCU bude použit pouze jeden krystal o frekvenci 4MHz. Reálný čas bude synchronizován z primární jednotky po zapnutí.

3.2.2 Návrh obvodu s MCU

Návrh obvodu sekundární jednotky je uveden v příloze 9. Jednostranná deska plošného spoje v příloze 10.

Napájecí napětí mikroprocesorového modulu sekundární jednotky je zvoleno na 5V. Toto napětí je dále stabilizováno obvodem MCP1700 [20] na požadované napětí MCU 3,3V. 5V větev slouží pouze pro napájení modré indikační LED signalizující správnost synchronizace času a tedy funkční bezdrátové spojení.

Konektor SV1 slouží pro připojení vstupně výstupního modulu. Na vstupních pinech jsou připojeny pull-up odpory o hodnotě 10kΩ. Konektor SV3 slouží pro připojení napájecího modulu. Mikrokontrolér bude využit k řízení samotného nabíjení. Pro sledování napětí na akumulátoru a zajištění správné funkce nabíječky, kde je nutné monitorovat některá napětí a proudy, je na port B a C připojen napěťový dělič snižující napětí přivedené na vstup AD. Dělící poměr byl zvolen 5:1 pro snímání napětí na akumulátoru a nabíjecího proudu a 10:1 pro sledování napětí externího zdroje. Maximální vstupní napětí na dělič bude tedy pro referenci 3,3V dostačujících 33V. Rozlišení AD převodníku v MCU je 10 bitů což odpovídá 1024 stavům. Rozlišení měření napětí je tak rovno vztahu (5).

$$U = 10 * \frac{3{,}3}{1024} \cong 0{,}0322V \tag{5}$$

Tranzistory *T6 a T7* slouží pro ovládání napájecího modulu. Vstup na portu C2 je indikační. Napájecí modul zde dává signál MCU ze spínače umístněného na krabičce, zda je sekundární jednotka sepnuta či nikoliv. Rozlišuje se tak aktivní mód, kdy jsou napájeny periferie a MCU sleduje koncové prvky a nabíjecí mód, kdy je dostupný externí zdroj energie a dochází pouze k dobíjení akumulátoru.

Na sběrnici SPI je dále připojen bezdrátový modul *RFM23B* (*RF1*). Bylo zvoleno stejného připojení jako v případě primární jednotky. Obsahem zapojení je také převodník na sériovou linku *RS-485* (*IC1*). Jedná se o stejný obvod jako v případě primární jednotky.

Tranzistory T1, T2, T4, T5 slouží k přímé drátové signalizaci primární jednotce. Díky těmto výstupům bude sekundární jednotka kompatibilní s jinými dostupnými časomírami.

Pro indikaci stavů nabíjení a další uživatelské zpětné vazby slouží čtveřice LED diod. Jedna z LED bude realizována jako dvoubarevná (červená/zelená). Tato LED bude sloužit pro indikaci nabíjení. Další zelená LED pro signalizaci zapnutí, tedy aktivaci režimu měření a poslední již zmíněná modrá LED pro kontrolu bezdrátového spojení.

Obvod obsahuje také dva spínače, které budou sloužit pro uživatelské nastavení chování jednotky. Jeden ze spínačů bude přepínat mezi aktivní hranou, při jejímž výskytu dojde k detekci a zastavení měřeného času. Druhý spínač umožní nastavení délky výstupní signalizace po uvedení snímače do výchozího stavu. Uživatel bude moci volit mezi krátkým okamžikem (0,5s) nebo dlouhým intervalem pro zřetelnou indikaci aktivace snímače (5s).

3.2.3 Vstupní a výstupní modul

Stejně jako v případě primární jednotky je nutné ošetřit vstupy z čidel před nechtěnými stavy. Zde již nevzniká potíž s velikostí napájecího napětí pro použití optočlenů. Přesto však jejich volba není zcela vhodná. Neumožňuje to požadavek na sekundární jednotku pro možnost snímání pasivních i aktivních snímačů. Proto je i zde použita varianta za použití schottkyho a zenerovy diod [14]. Volba režimu mezi napájením ze sekundární jednotky nebo čidla bude řešena přepínačem uvnitř zařízení. Nepředpokládá se jeho časté použití, proto byla zvolena tato varianta. Schéma 3 znázorňuje návrh vstupně výstupního bloku sekundární jednotky. Celé schéma je uvedeno v příloze 17 i s deskou plošného spoje v příloze 16.

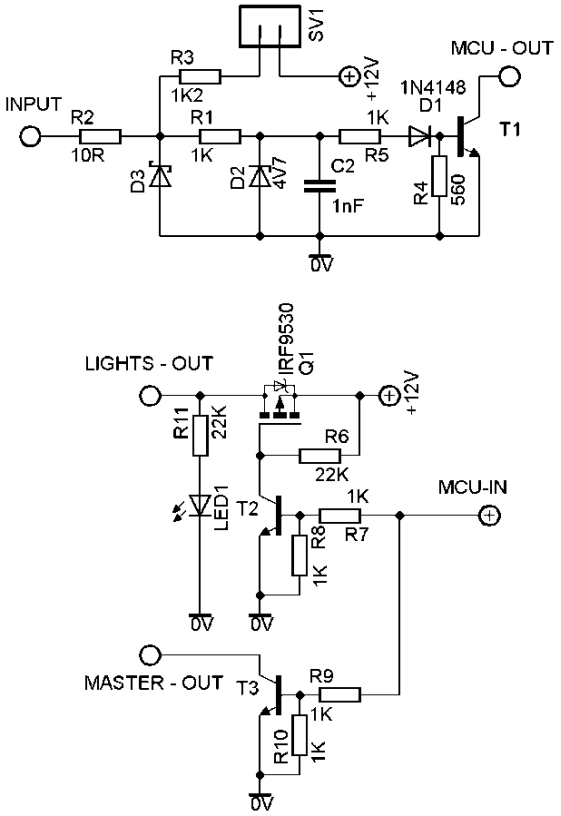


***Schéma 3**-vstupně výstupní modul sekundární jednotky*

Horní část schématu zobrazuje návrh vstupního bloku. Vstup obsahuje pouze jeden NPN tranzistor. Kvůli této variantě bylo nutné před jeho bázi vložit jednu diodu D1 pro zvýšení nutného napětí k otevření tranzistoru. Toto opatření je aplikováno kvůli ochranným diodám v NPN indukčnostních snímačích jejichž nulová hodnota má velikost přibližně 0,8V. Použitím diody před tranzistorem zvětšíme napětí nutné k jeho otevření na 1,2V (dva PN přechody) a tím zajistíme jeho rozepnutí při aktivaci indukčnostního snímače.

Spínač SV1 slouží k definování zdroje napájení. Pokud bude sepnutý, bude vstup napájen samotnou jednotkou a umožní tak připojení pasivních snímačů. Při jeho rozepnutí naopak nabídne možnost použití aktivních PNP čidel.

Výstupní obvod znázorněn v dolní polovině Schématu 3 obsahuje jeden výkonný MOSFET tranzistor ke spuštění externí signalizace například světlem nebo zvukovou signalizací (*LIGHTS-OUT*). K této indikaci bude sloužit také LED dioda umístěná přímo na sekundární jednotce u patřičného vstupu. Druhý výstup označený jako *MASTER – OUT* uzemní výstup náležící danému vstupu a signalizuje tak zastavení času. Tato funkce slouží pro přímou drátovou variantu měření a je kompatibilní s jinými měřicími systémy.

3.2.4 Napájecí modul

Vzhledem k nutnosti napájení snímacích prvků ze sekundární jednotky byl jako zdroj energie zvolen 6 článkový olověný akumulátor s napětím 12V. K akumulátoru bylo nutno navrhnout adekvátní nabíjecí obvod s omezením nabíjecího proudu a režimem konzervace akumulátoru po jeho nabití. Návrh tohoto obvodu je po jednotlivých částech uveden v příloze 11, 12, 13 a 14.

Skládá se celkem ze 4 jednotlivých částí umístěných na jedné oboustranné desce plošného spoje (příloha 15). První částí je nabíjecí obvod, druhou stabilizace napětí 12V, třetí snížení napětí na 5V a poslední odpojení napájení snímačů v případě, že je jednotka pouze v nabíjecím módu (není sepnutý hlavní spínač sekundární jednotky).

Nabíjecí část

Návrh této části zobrazuje schéma v příloze 11. Nabíjecí obvod je realizován pomocí lineárního stabilizátoru od společnosti *Texas Instruments LM2941* [24], který má nastavitelné výstupní napětí. Případná nadbytečná tepelná emise zde není podstatná, jelikož je při nabíjení použito externího zdroje energie. Nabíjení zahájí MCU uzemněním vstupu *CHARGING,* poté co detekuje dostatečného napájecího napětí na vstupu jednotky. Obvod *LM2941* je nízkoúbytkový, díky čemuž je možné zahájit nabíjení již při napětí 15V. Tranzistor Q3 bude v první fázi nabíjení uzavřen. Výstupní napětí bude tedy závislé pouze na hodnotě odporu R14 a ladícím trimru R12, které nastavují nabíjecí napětí přibližně 14,4V. K omezení proudu slouží tranzistor Q2. Na

jeho bázi je odpor definující maximální proud 0,2A. Při této hodnotě proudu je na R10 úbytek 0,6V, který způsobí otevírání Q2 a tím zpětně snižuje výstupní napětí stabilizátoru. Tekoucí proud je sledován jako úbytek napětí na R13 a diodě D5. V okamžiku, kdy tento proud poklesne na nastavenou úroveň (přibližně 30mA), dojde k přepnutí nabíjecího režimu do režimu konzervace. MCU otevře Q3 vstupem *CHARG/PRESET* a připojí tak paralelní odpor R10 a trimr R11 čímž sníží napětí stabilizátoru na hodnotu 13,6V udržujícím akumulátor v nabitém stavu. Dioda D5 v tento okamžik zamezuje zpětnému proudu z akumulátoru do stabilizátoru. Dioda se opětovně otevře po samovolném snížení napětí na akumulátoru na novou přednastavenou hodnotu.

Pro připojení akumulátoru k obvodu slouží spínač připojený na konektoru *Switch.* Za ním také MCU sleduje stav pro rozlišení mezi běžícím a nabíjecím režimem. Proud z akumulátoru teče pouze v případě, pokud je jeho napětí menší než napětí externího zdroje. O oddělení těchto napětí se stará běžná dioda D3. Na vstupu externího napájení je ochranná dioda D1 (schottkyho) a pojistka, přes kterou teče i proud z interního akumulátoru. Díky kombinaci typů D1 a D3 je v případě použití externího zdroje dalšího akumulátoru, bude proud odebíraný nejprve z externího zdroje, teprve poté bude připojen přes D3 interní akumulátor.

Stabilizace 12V

Druhá část napájecího modulu, jejíž schéma je uvedeno v příloze 12, znázorňuje hlavní 12V stabilizaci, která je rozdělena na dvě větve. Napájecí blok automaticky přepíná mezi nutnou stabilizací a přímím připojením zdroje energie. Pokud je připojen olověný akumulátor, není třeba napětí dále stabilizovat. Automaticky dojde k sepnutí tranzistoru T4 a odpojení stabilizátoru LM2940-12 [25] pomocí T2. Obvod je schopen správně pracovat a stabilizovat i při napětí o málo větším než je jeho nominální hodnota. Vše ovšem za cenu zvýšeného samoodběrového proudu až na 100mA. To je pro zajištění maximální výdrže akumulátoru nežádoucí. Proto bylo zvoleno řešení s odpojením stabilizace.

V případě připojení zdroje s větším napětím (pro nabíjení například 15V až 24V) bude již nutné napětí stabilizovat. Ten okamžik se aktivuje stabilizátor a odpojí se přímé připojení zdroje energie. Dioda D4 zabraňuje zpětnému proudu do stabilizace při přímém připojení zdroje energie.

Přepínání mezi jednotlivými režimy napájení je automatizováno pomocí zenerovy diody D2. Pokud je napájecí napětí větší než zenerovo (13V) + napětí PN přechodu tranzistoru Q1, tedy napětí o hodnotě 13,6V, dojde k otevření Q1 a aktivaci stabilizátoru IC2. Tento okamžik se také zavírá unipolární tranzistor přímé napájecí větve.

Stabilizace 5V

Třetí částí napájecího modulu se stará o stabilizaci na 5V nutných k napájení mikrokontroléru. Zde jsou již kladeny požadavky na co nejmenší tepelnou emisi. Proto byl pro snížení napětí zvolen snižující měnič od firmy Microchip MCP1640 [19] s účinností až 96%. Zapojení bylo voleno dle datového listu s výstupním napětím 5V. Schéma je dostupné v příloze 13.

Odpojení napájení

Poslední částí napájení je odpojení zdroje energie pro koncové snímače v případě, že je jednotka uvedena do režimu nabíjení. O toto oddělení se stará MOSFET tranzistor T5. Tranzistor Q5 na stejném schématu signalizuje sepnutí spínače. Zapojení uvádí schéma v příloze 14.

4 REALIZACE KOMPONENT

Realizace veškerých částí měřicího systému byla uskutečněna s ohledem na celkovou robustnost a minimální rozměry. Obě jednotky se skládají z několika samostatných komponent. Provedení na jedné centrální desce bylo zamítnuto pro možnost snadné výměny části zařízení, například vstupního modulu, u nějž je zvýšené riziko poruchy vlivem selhání lidského faktoru.

Pro připojení snímačů a vzájemné spojení obou jednotek vodičem byly zvoleny průmyslové konektory typu M12 (*obrázek 16*). Jejich provedení se stupněm krytí IP68 zajišťují kvalitní spojení mezi komponenty.

Pro bezdrátový přenos byly obě jednotky opatřeny anténou se ziskem 3dBi s standardním SMA konektorem. Jinou variantou je prodloužení antény na koaxiálním kabelu s impedancí 50Ω, například RG-58.

Obrázek 16 *- Konektor M12*

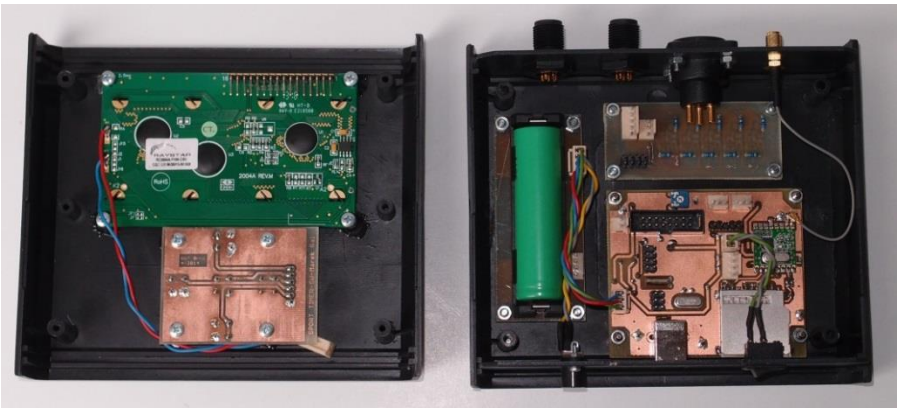
4.1 Primární jednotka

Primární jednotka časoměrného systému se skládá z celkem 5 modulů. Modul s mikrokontrolérem, ošetření vstupů, napájení, LCD displej a modul s tlačítky, které jsou vzájemně propojeny konektory. Celkovou podobu zařízení zobrazuje *obrázek 17*. Vnitřní uspořádání je pak na *obrázku 18*.

Obrázek 17 *- finální podoba primární jednotky*

Jednotka byla uložena do plastové přístrojové krabičky s rozměry 150x130x50mm. Na horní straně byl vyřezán otvor pro LCD displej a vyvrtána pětice otvorů pro ovládací tlačítka. Na spodní čelní straně je umístěn konektor napájení pro externí adaptér se stabilizovaným napětím 5V (napájecí konektor 2,5mm). Uprostřed se nachází USB konektor a vpravo slot pro SD kartu. Nad tímto slotem je ještě hlavní spínač primární jednotky. Ten může v jednoduché aplikaci sloužit k přímému odpojení napájení nebo po připojení k připravenému vstupu mikrokontroléru k signalizaci pro přechod do *SLEEP* módu.

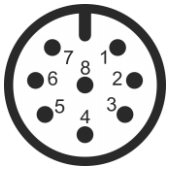
Tento příkaz bylo možné realizovat také speciální funkcí některého z pětice tlačítek na horní straně krabičky. Ovládací prvky jsou však díky zvolenému umístnění náchylné na nechtěné zmáčknutí například při převozu. Proto se jako vhodnější varianta jevilo doplnit zařízení o tento skrytý kolébkový spínač.



Obrázek 18 *- vnitřní uspořádání primární jednotky*

Horní čelní strana obsahuje dvojici konektorů pro připojení sekundárních jednotek. Jedná se o jeden 8-pinový (*obrázek 19*) a jeden 3-pinový průmyslový konektor typu M12 (*obrázek 20*). Na 8-pinové variantě je vyvedena jedna ze sběrnic RS-485 a čtyři přímé vstupy primární jednotky. Druhý 3-pinový konektor je připojen na druhou sběrnici RS-485. Ta může být využita například pro připojení externího LED zobrazovače či druhé sekundární jednotky. Uprostřed je dále XLR konektor pro připojení startovací pistole. Tento vstup je využit pro hlavní startovací impuls. Posledním konektorem je SMA konektor pro vysokofrekvenční signál z bezdrátového modulu. Na tento konektor lze připevnit libovolnou běžně dostupnou anténu pro pásmo 868MHz.

Na spodní straně jednotky se nachází malý otvor, za nímž je umíněno tlačítko na modulu napájení. To sloužící k restartu primární jednotky v případě chyby ve firmwaru.



Obrázek 19 *- zapojení konektoru M12 - 8 pinů*

Popis připojení 8-pinového konektoru M12 pro přímé drátové propojení mezi primární a sekundární jednotkou je následující. *Obrázek 19* zobrazuje vidlici umístněnou na krabičce.

1 – zem
2 – 1. měřený čas
3 – 2. měřený čas
4 – 3. měřený čas
5 – 4. měřený čas
6 – RS-485 A
7 – RS-485 B
8 – nezapojeno

Obrázek 20*- zapojení konektoru M12 - 3 piny*

Popis připojení 3-pinového konektoru M12 na krabičce primární jednotky je následující. Na konektor je vyvedena druhá sériová směrnice RS-485.

1 – zem
2 – RS-485 A
3 – RS-485 B

Obrázek 21 zobrazuje zapojení XLR konektoru použitého pro 5. vstup jednotky, který slouží pro hlavní startovací impuls. Na konektor je vyvedeno také napětí 5V, které slouží pro napájení případného obvodu například sledujícího mikrofon.

Obrázek 21 *- zapojení XLR konektoru - 5. vstup časomíry*

1 – výstup napájení 5V

2 – zem
3 - vstup

4.2 Sekundární jednotka

Tato jednotka je složena z celkem 3 nezávislých vnitřních komponentů. Hlavní jednotka s MCU, vstupně/výstupní modul a modul napájení. Uvnitř se nachází také malý olověný akumulátor o napětí 12V. Nutné bylo také vhodně navrhnout umístění pojistky a chladiče na modulu napájení. Jako ideální řešení se ukázalo postavit desku napájení vertikálně a paralelně ji spojit s chladičem s distancí 7mm. Vedle chladiče pak vzniklo dostatečné místo pro pojistku, která je viditelná a snadno vyměnitelná.

Komponenty jsou umístěny do bílé plastové krabičky o rozměrech 190x140x70. Provedení krabičky je se stupněm krytí IP56, které zajišťuje ochranu před prachem a tryskající vodou. Výslednou podobu zobrazuje *Obrázek 22*. Vnitřní uspořádání je pak na *obrázku 23*.

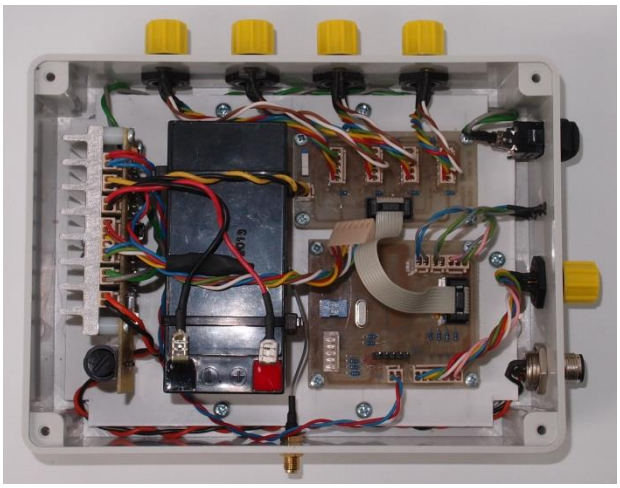
Obrázek 22 *- finální podoba sekundární jednotky*

Na jedné boční straně se nachází čtveřice 4-pinových konektorů M12 (*obrázek 24*) sloužící pro připojení snímacích prvků měření. Konektory jsou opatřeny krytkou zamezující vniknutí vody či nečistot v případě nevyužití vstupu pro měření. Nad každým konektorem se nachází signalizační žlutá LED informující o aktivaci patřičného vstupu. Na čelní straně je dále umístěn výstupní konektor M12 s 8 piny (*obrázek 19*). Jeho zapojení je shodné s primární jednotkou. 3-pinový konektor M12 vlevo slouží pro připojení externího zdroje energie či zdroje pro nabíjení (*obrázek 21*).

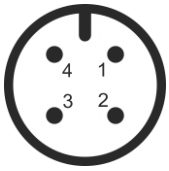
1 – zem
2 – napájecí napětí 12V-24V.

Ke spuštění sekundární jednotky je na krabičce dále voděodolný kolébkový spínač. Posledním prvkem na této straně přístroje je trojice indikačních LED diod. Horní zelená indikuje zapnutí zařízení, prostřední modrá zda došlo k časové synchronizaci a bude využito bezdrátového spojení. Spodní LED je v provedení dvoubarevné zelená/červená, která bude sloužit k indikaci stavů nabíjení.

Na druhé boční straně je již pouze SMA konektor sloužící pro připojení antény v pásmu 868MHz.



Obrázek 23 *- vnitřní uspořádání sekundární jednotky*



Obrázek 24 *- připojení snímacích prvků k sekundární jednotce*

1 – zem
2 – vstup
3 – výstup signalizace
4 – výstup 12V

5 FIRMWARE

Tato kapitola popisuje nejzásadnější části aplikovaného firmwaru do primární a sekundární jednotky. Jedná se především o měření času a časovou synchronizaci. Firmware byl napsán v jazyce C [1] za použití volně dostupných vývojových prostředků firmy Microchip [13]. Prostředí pro psaní kódu bylo zvoleno MPLAB X s kompilátorem XC16. K programování a odladění programu sloužil programátor a debugger PicKit3 od stejného výrobce.

5.1 Měření času

Je realizováno za pomocí časovače s komparátorem, který zajistí automatické vynulování časovače při shodě s přednastavenou hodnotou. Časovač čítá s frekvencí průběhu programu. Jedna instrukce přitom trvá 2 periody frekvence oscilace. V zapojení je použit 4MHz krystal což udává periodu průběhu instrukcí 0,5us. K časovači je přiřazena ještě 8 násobná dělička frekvence což odpovídá periodě čítání 4µs. Pro periodu přerušení 0,1s je nutné, aby časovače načítal hodnotu 25000 cyklů. Tato hodnota je přednastavena v registru PR1. V okamžiku, kdy se čítaná hodnota s přednastavenou shoduje, dojde k automatickému vynulování časovače a přerušení, ve kterém je inkrementován hlavní časový registr. Výpočet přednastavené hodnoty pro požadovanou periodu zle provést pomocí vzorce (6).

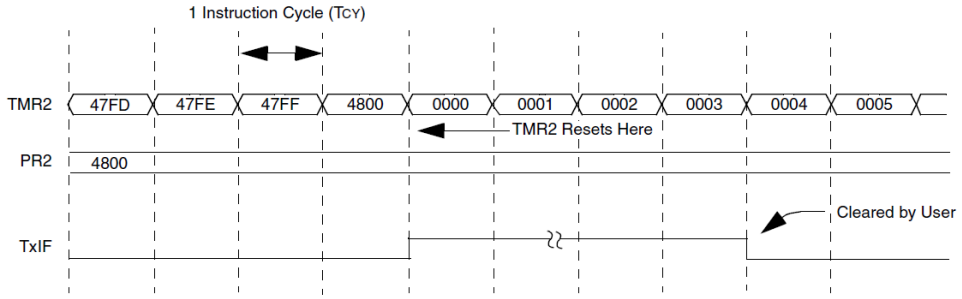
Hlavní časový registr je složen ze čtyř bytové paměti typu *signed long* a počítá celé desetiny sekundy. Znaménková paměť byla zvolena z důvodu usnadnění počítání s případnou zápornou časovou hodnotou. Registr se automaticky nuluje po zapnutí jednotky a začíná čítat od nuly. V zapnutém režimu běží neustále a čítá tak reálný čas vztažený k okamžiku zapnutí jednotky. Doba přípustného měření bez vypnutí jednotky vychází z velikosti registru pro desetiny. Ten přeteče do záporných čísel po načítání 2^{31}, tedy v případě, že bude primární jednotka spuštěna déle než téměř 7 let. K takové situaci by při běžném provozu rozhodně nemělo dojít.

$$TMR = T \div \left(\frac{2 \times d}{F_{osc}}\right) - 1 \qquad (6)$$

TMR - přednastavená hodnota pro přerušení
T – žádaná perioda čítání
d - dělící poměr časovače
F_{osc} – frekvence krystalu

Jedničku je nutno odečíst, jelikož přerušení a nulování nastává až na konci periody cyklu čítání, kdy došlo ke shodě hodnoty časovače s hodnotou přednastavenou.

Postup čítání a nulování zobrazuje *obrázek 25*. PR2 je registr s přednastavenou hodnotou, TMR2 registr časovače a signál TxIF stavový bit vyvolání přerušení.



Obrázek 25 *- příklad nulování časovače při shodě s přednastevenou hodnotou [27]*

Tuto časovou rutinu obsahují obě jednotky měřicího systému. Výsledný čas je vždy dopočítán z rozdílu dvou časových razítek vytvořených vždy na začátku a konci měření (1). Razítko se skládá z aktuální hodnoty desetinného čítače a 16 bitové hodnoty interního časovače. Lze tak dosáhnout rozlišení měření až 4µs.

V tomto formátu jsou prováděny i veškeré časové výpočty, pro které byly vytvořeny speciální rutiny.

Pro přepočet na uživatelsky čitelný čas byla vytvořena další rutina, která ze získaného rozdílu přepočítá skutečný čas ve formátu MM : SS : ss. Takto přepočtená hodnota je již zobrazena na LCD displej.

MM – minuty
SS – sekundy
ss - setiny sekundy

Například čas 01:22:84 znamená 1 minuta, 22 sekund, 84 setin sekundy.

5.2 Bezdrátová komunikace

Pro zajištění bezdrátového přenosu dat bylo nejprve nutné vytvořit vlastní knihovnu obsluhy bezdrátového modulu. Komunikace s modulem probíhá na SPI sběrnici, k čemuž bylo využito interního SPI rozhraní samotného mikrokontroléru.

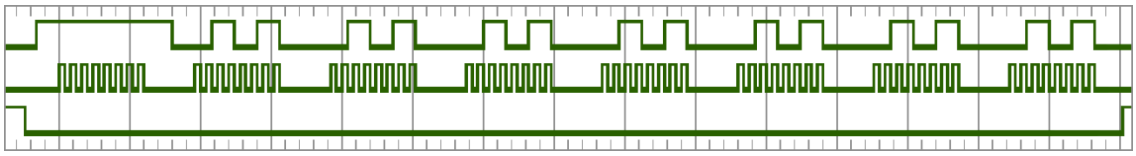
Dalším krokem je správné nastavení 127 registrů radiového modulu RFM23B. Je nutné zvolit výstupní frekvenci na hodnotu 868MHz, datový tok přenosu (zvolen experimentálně 56kbps) a metody komunikace. Tato aplikace využila konkrétně interního FIFO zásobníku s funkcí *Packet Handler* popsanou v kapitole 2.3.8. Mikrokontrolér není díky tomu zatěžován filtrací neplatných dat. O to se stará právě již bezdrátový modul. Na SPI jsou vyčtena už jen samotná data.

Délka zprávy byla zvolena s ohledem na nejčastěji odesílaný obsah v podobě časových razítek na 7 bytů. 6 bytů slouží pro přenos razítka, zbylý byte pak jako identifikační značka, která určuje, zda se jedná o součást synchronizace, potvrzující zprávu či razítko konce měření. Vysílaný paket je v bezdrátovém modulu ještě automaticky doplněn o *Preamble* bity, 4 bytový synchronizační klíč nutný k identifikaci mezi zařízeními, délku paketu a *CRC*.

Vzhledem k použité metodě měření se synchronizací časů, není nutné zajistit urgentní odesílání zpráv o zastavení času v okamžiku detekce konce měření. Odeslání a zpracování dat z bezdrátového modulu je tedy řešeno v hlavní smyčce *main*. K tomu bylo třeba vytvořit zásobník dat pro odeslání. V okamžiku detekce podnětu pro zastavení času se v přerušení pouze vytvoří časové razítko, uloží do paměti a vloží do zásobníku pro odeslání dat. Tím není přerušení tolik vytížené a může pružně reagovat na jiné podněty. Pokud program detekuje platná data na zásobníku, spustí se rutina pro jejich odeslání.

Tato rutina zašle data uložená na zásobník do interního FIFO registru bezdrátového modulu. Odeslání je zahájeno aktivací vysílacího režimu zápisem hodnoty 0x09 do registru 0x07. Je také povoleno přerušení od bezdrátového modulu při dokončení odesílání dat. Až do indikace tohoto přerušení je mikroprocesor informován o nemožnosti odeslání dalších dat.

Obrázek 26 zobrazuje průběh na SPI sběrnici při zápisu 7 bytů o hodnotě 0x33 do FIFO zásobníku pro odeslání dat. Horní průběh znázorňuje výstupní signál SDO, prostřední hodinový signál SCK a spodní vstupní signál SDI.



Obrázek 26 *- průběh SPI při zápisu dat do FIFO zásobníku bezdrátového modulu*

Každé odeslání paketu následuje čekáním na odpověď, které zaručuje bezchybné doručení dat. Pokud odpověď nedorazí do definovaného času, data jsou na zásobníku ponechána. Dojde tak k opakovanému pokusu o odeslání paketu. Pokusy jsou celkem tři, poté jsou data zahozena. V opačném případě by došlo k přetečení zásobníku vlivem nekonečných neúspěšných pokusů o odeslání jednoho paketu. Mezitím by totiž podněty z cílových prvků plnily zásobník dalšími daty.

Byla experimentálně změřena doba od začátku odesílání dat po přijetí potvrzující zprávy. Délka této komunikace je 0,01947ms. Může se však mírně měnit díky možnému vstupu přerušení do odesílací či přijímací rutiny.

Přijetí a zpracování dat je již řešeno bez zásobníku. Přerušení pouze detekuje přijetí dat a nastaví stavový bit. Ten je v *main* smyčce pravidelně čten. Pokud byl tento

bit nastaven, mikrokontrolér načte přijatá data z bezdrátového modulu a připraví jej k dalšímu přijetí dat. Následně dojde k nastavení speciálního bitu přikazujícího odesílací rutině přednostní odeslání potvrzující zprávy. Tento příkaz není vykonán pouze v případě, že přijatá data jsou potvrzení z předešlé komunikace. Data jsou také okamžitě zpracována a vyhodnocena. Pokud se jedná například o přijetí časového razítka z konce měření, je hodnota uložena do paměti pod patřičný měřicí vstup.

Speciální rutina je spuštěna v okamžiku synchronizace časů. Zde je nutné odeslat skutečný aktuální čas v okamžiku odeslání. Synchronizační data jsou vložena běžným způsobem na zásobník. Pokud však odesílací rutina detekuje data synchronizace, přibalí se časové razítko těsně před odesláním samotného paketu.

5.3 Časová synchronizace

Pro synchronizaci časů mezi oběma jednotkami byl využit algoritmus popsaný v kapitole 2.3.7. Rutina se skládá ze 4 časových razítek, které jsou vyměněny mezi jednotkami. Sekundární jednotka si vždy synchronizuje hodiny s jednotkou primární, nikdy ne naopak. Synchronizace probíhá v pravidelných časových intervalech.

Sekundární jednotka potvrzuje úspěšnou synchronizaci na modré LED diodě. Pokud neproběhla žádná synchronizace, nedochází vůbec k odesílání dat. Taková data by totiž nebyla validní. Pokud nedojde k časové synchronizaci do stanoveného intervalu, bude jednotka chybu indikovat blikáním modré LED diody. Nová data budou stále odesílána, je zde však riziko vzniku chyby měření způsobené rozchodem obou časů. Po uplynutí dalšího času bez synchronizace automaticky přejde sekundární jednotka pouze do drátového režimu. Tedy zhasne LED, nebude data bezdrátově odesílat a použije pouze přímé výstupy.

5.4 Měření drátovou variantou

K využití tohoto režimu měření slouží 8-pinové konektory na primární a sekundární jednotce. Primární jednotka vytvoří své vlastní časové razítko, pokud dojde k detekci konce měření na patřičném vstupu. Signál pro zastavení měření je zde řešen uzemněním patřičného vstupu. Toto měření je přednostní před bezdrátovou komunikací a bude funkční vždy za jakýchkoliv okolností.

Sekundární jednotka vždy při detekci podnětu k zastavení měření uzemní patřičný výstup. Ten slouží pro indikaci primární jednotce. Současně přes tranzistor spouští externí indikaci.

5.5 Nastavení sekundární jednotky

Sekundární jednotka umožňuje uživateli nastavit aktivní hranu změny stavu na snímačích. Podle tohoto nastavení bude jednotka reagovat a vytvářet časová razítka. Druhým nastavením je délka doby externí indikace. Bude volitelná mezi hodnotami 0,5s a 5s.

5.6 Shrnutí principu měření

Jednotlivá časová razítka bude shromažďovat primární jednotka. K měření času je zapotřebí minimálně dvou těchto otisků. Pro začátek a pro konec měření. Razítko pro začátek měření se vytvoří v okamžiku, kdy primární jednotka detekuje zápornou hranu na 5. vstupu zařízení (XLR konektor). V tento okamžik dojde v mikrokontroléru k přerušení a vykonání patřičné rutiny, kde dojde k uložení vytvořeného časového razítka. Jinou variantou bude zaznamenání časového otisku z jiné sekundární jednotky. Start tak může být řešen také bezdrátovým spojením.

V okamžiku detekce aktivní hrany sekundární jednotkou, dojde opět k přerušení, vytvoření časového otisku a předání dat odesílacímu zásobníku. Data jsou následně přenesena primární jednotce, která vyhodnotí rozdíl časů a výsledek zobrazí na displeji. Razítko konce měření může vytvořit i samotná primární jednotka po detekci záporné hrany na patřičném vstupu.

5.7 Řešení přerušení

Zvolený mikrokontrolér disponuje několika desítkami přerušení od periferií. Pro firmware v této aplikaci jsou nejdůležitější především přerušení od časovače a přerušení při změně stavu na patřičném vstupním pinu. Mikrokontrolér umožňuje také nastavit prioritu, podle které se bude přerušení volat. Je žádoucí, aby priorita změny stavu byla větší než priorita přerušení časovače. Zamezí se tak možnému zpoždění při vytvoření časového razítka v okamžiku, kdy by probíhala rutina přerušení časovače a současně by došlo ke změně stavu na vstupním pinu. Obsluha vstupů by totiž čekala na dokončení rutiny časovače.

5.8 Uživatelské rozhraní primární jednotky

Naměřená data jsou zobrazena na alfanumerický LCD display. První řádek displeje je částečně využitý jako stavový, kde je zobrazen stav akumulátoru a případná porucha synchronizace. Je aplikováno jednoduché menu nastavující počet drah měření. Navigace je řešena pomocí pětice tlačítek na předním panelu.

6 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ

Měřením byly ověřeny základní funkce časoměrného systému. Jednalo se především o ověření správného počítání časovače a výsledek synchronizace, který byl zásadní pro samotné bezdrátové měření. Předmětem testování byly také vstupní moduly zařízení. Zde bylo nutné zjistit chování jejich spínání za požití dlouhého vodiče.

6.1 Měření časového intervalu

Toto měření bylo provedeno v laboratoři za pomocí čítače Hewlett Packard HP53131A. Na výstupní pin mikrokontroléru byl přiveden signál s periodou 1s. Perioda byla následně změřena zmíněným čítačem. Bylo provedeno 10 pokusných měření při použití hlavního krystalu 4MHz a teoreticky nastavených parametrů (PR1 = 24999), parametrů s korekcí (PR1 = 25001) a měření s použitím sekundárního krystalu 32,768kHz (PR1 = 32167). Korekce byla provedena na základně výsledku z prvního měření. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 5.

Tabulka 5 *- měření periody 1s na výstupu mikrokontroléru*

č. měření	T[s]		
	4MHz		32,168kHz
	PR1 = 24999	PR1 = 25001	PR1 = 32167
1	0,999893208	0,999973272	1,000108675
2	0,999893215	0,999973277	1,000108682
3	0,999893217	0,999973277	1,000108929
4	0,99989322	0,999973279	1,000108682
5	0,999893215	0,99997328	1,000108686
6	0,999893226	0,99997328	1,000108687
7	0,999893221	0,999973282	1,000108687
8	0,999893224	0,999973282	1,000108688
9	0,999893228	0,999973287	1,000108688
10	0,999893225	0,999973283	1,000108937

Pro měření byla spočítána i rozšířená kombinovaná nejistota [28]. Výsledky výpočtu shrnuje tabulka 6.

Tabulka 6 *- výpočet nejistoty pro měření periody 1s [28]*

	4MHz		**32,168kHz**
	PR1 = 24999	**PR1 = 25001**	**PR1 = 32167**
x [s]	0,99989322	0,99997328	1,000108734
Δx [s]	0,00010678	$2{,}67202\times10^{-5}$	-0,000108734
U_a [s]	$6{,}12903\times10^{-10}$	$4{,}18016\times10^{-10}$	$1{,}04829\times10^{-8}$
U_b [s]	$1{,}25\times10^{-9}$	$1{,}25\times10^{-9}$	$1{,}25\times10^{-9}$
U_{bx}[s]	$7{,}22\times10^{-10}$	$7{,}22\times10^{-10}$	$7{,}22\times10^{-10}$
U_c [s]	$1{,}39217\times10^{-9}$	$1{,}31804\times10^{-9}$	$1{,}05572\times10^{-8}$
U [s]	$4{,}17652\times10^{-9}$	$3{,}95413\times10^{-9}$	$3{,}16715\times10^{-8}$

x – průměrná hodnota
Δx – absolutní chyba
Ua – nejistota typu A
Ub – absolutní chyba měřicího přístroje
U_{bx} – nejistota typu B s rovnoměrným rozložením
Uc – kombinovaná nejistota
U – rozšířená kombinovaná nejistota

Měření ukázalo mírnou neshodu s požadovanou hodnotou. Odchylka při teoreticky nastavených parametrech a použití 4MHz krystalu je 0,00010678 za sekundu a vytvoří na 1 minutě chybu 6,4ms. Při použití korekce hodnoty časovače je odchylka $2{,}67202\text{x}10^{-05}$. Chyba na 1 minutě je v tomto případě 1,6ms. Za použití hodinového krystalu s frekvencí 32168 je absolutní chyba -0,000108734, tedy ještě větší než při původním nastavení s 4MHz krystalem. Odchylka na minutě je zde -6,52ms.

6.2 Měření rozdílu času po synchronizaci

Toto měření mělo za cíl demonstrovat přesnost a účelnost synchronizace. Pro jeho realizaci bylo nutné připojit na vstupy primární a současně sekundární jednotky jeden spínač. Při jeho sepnutí došlo k vytvoření současně dvou časových razítek. První razítko se vytvořilo v primární jednotce, druhé v sekundární, které bylo následně bezdrátově odesláno primární jednotce. Ta oba časy zobrazila na displej. Bylo provedeno 10 pokusných měření. Vždy nejprve došlo k synchronizaci času a následovalo zmáčknutí tlačítka pro vytvoření časových razítek. Výsledek měření je uveden v Tabulce 7.

Tabulka 7 *- měření synchronizace časů*

č.	t_{primar} [m:s]	$t_{sekundar}$ [m:s]	Δt [s]
1	2:3,087584	2:3,08758	4E-06
2	2:29,146252	2:29,146252	0
3	3:2,102912	3:2,102916	-4E-06
4	3:26,9695	3:26,969496	4E-06
5	3:59,827588	3:59,827588	0
6	4:23,864608	4:23,864608	0
7	4:44,908408	4:44,908408	0
8	5:7,632532	5:7,632532	0
9	5:29,090792	5:29,090792	0
10	6:21,067412	6:21,067408	4E-06

Je zřejmé, že časy se ve většině případů zcela shodovaly. Odchylka činila jen ve 4 případech pouhé 4μs což odpovídá rozlišení samotného časovače. Chyba je způsobena pravděpodobně zaokrouhlením při přepočtu časů podle (2).

6.3 Testování vstupních modulů

Cílem měření bylo ověřit chování vstupních modulů primární i sekundární jednotky a zjistit jejich zpoždění. Kromě samotné prodlevy byla měřena také hrana změny stavu. K měření byl použit osciloskop UNI-T UTD4202C a generátor Agilent 33522A. Jako spínací člen pro vstup primární jednotky sloužil bipolární NPN tranzistor, na jehož bázi byl přiveden signál z generátoru. Toto uspořádání mělo simulovat propojení primární a sekundární jednotky. Samotné propojení bylo realizováno vodičem o celkové délce 70m, který zajišťoval reálné podmínky při měření času. Bylo nutno také dbát na správné oddělení zemí při měření, tak aby proud tekoucí signálním vodičem tekl skutečně oběma směry a ne přes zem spojenou na osciloskopu.

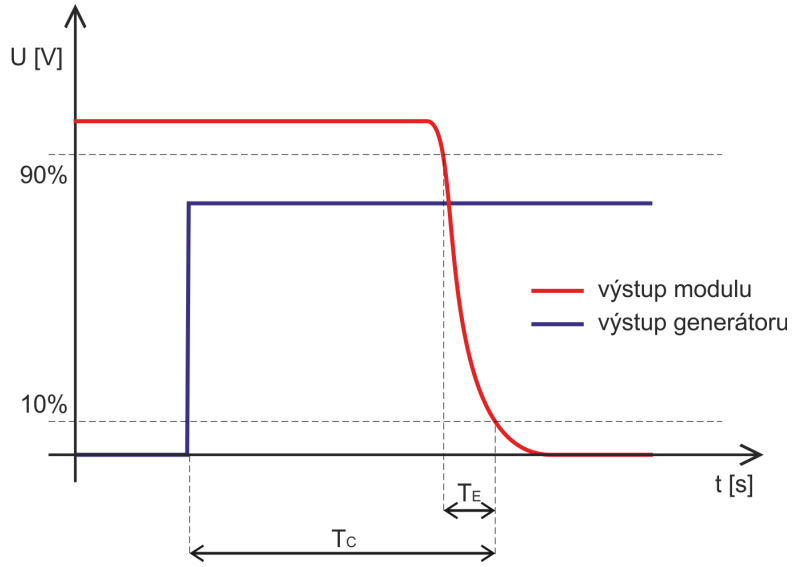
Na vstupní modul sekundární jednotky byl přiveden přímo výstup generátoru, pro simulaci použití aktivního snímače, stejně tak NPN tranzistor podobně jako u primární jednotky. Do série s tímto uspořádáním byla navíc zařazena i ochranná dioda pro ověření funkčnosti s tímto členem ve snímači. Tato problematika je popsána v kapitole 2.2.3. Výsledky měření shrnuje tabulka 8.

Tabulka 8 *- hodnoty měření vstupních obvodů*

Jednotka:	***Primární***	***Sekundární***	
Typ snímače:	***Pasivní (NPN)***	***Aktivní***	***Pasivní (NPN)***
Doba zpoždění T_C	784ns	460ns	2,12μs
Délka hrany T_E	16ns	64ns	440ns

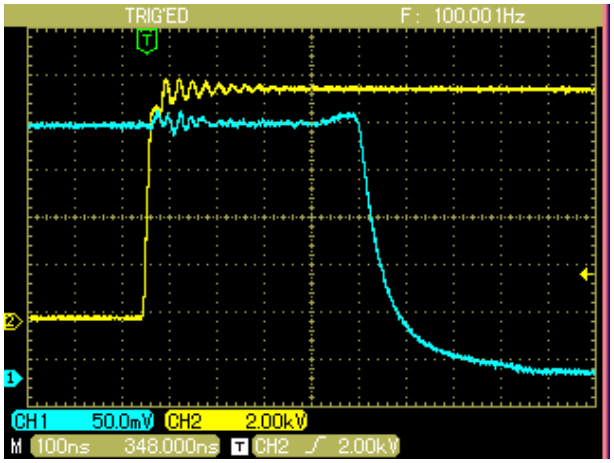
Dobou zpoždění je myšlena doba od změny hrany na výstupu generátoru po dokončení přechodového děje detekovaného na výstupu vstupního modulu. Grafický popis měření zobrazuje *obrázek 27*. Grafy jsou navzájem fázově posunuty o 180° díky zapojení NPN tranzistoru se společným emitorem na výstupu modulu. Délka hrany je měřena mezi 10% a 90% rozsahu napětí. Pro vhodné zobrazení na osciloskopu a zajištění dokončení přechodového děje byl na výstup generátoru přiveden obdélníkový signál s frekvencí 100Hz.

Nejdelší čas byl naměřen při použití pasivního snímače u sekundární jednotky a to 2,12µs. Tato hodnota je však menší, než nejmenší možná rozlišovací jednotka měření času. Vstupní moduly zanesou do měření jen minimální chybu. Výsledek tohoto měření je tak zcela jistě uspokojivý.

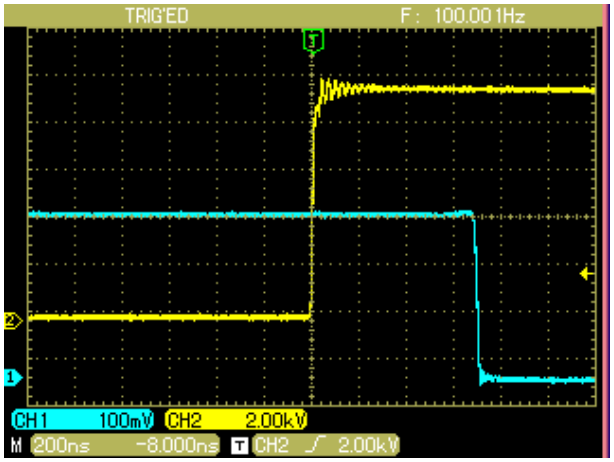


Obrázek 27 *- znázornění měření zpoždění vstupního obvodu*

Předmětem tohoto měření bylo také zobrazení průběhu napětí na samotném vodiči pro zjištění případných zákmitů či jiných nepřípustných stavů. Průběh na *obrázku 28* zobrazuje měření na vstupu primární jednotky. Na výstupu z generátoru jsou zřejmé zákmity způsobené pravděpodobně špatným přizpůsobením přívodního vedení. Zákmity se projevili i na samotném vodiči u vstupního modulu. Za vstupním modulem na *obrázku 29* je však již viditelná pouze signalizační hrana mikrokontroléru.



Obrázek 28 *- průběh na vodiči při spínání vstupu primární jednotky*



Obrázek 29 *- průběh na výstupu vstupního modulu primární jednotky*

Modrý kanál č. 1 znázorňuje průběh měření na vstupním modulu. Na *obrázku 28* se jedná o průběh na vodiči, na *obrázku 29* pak o výstup měřeného modulu. Žlutý kanál č. 2 znázorňuje výstup funkčního generátoru.

7 ZÁVĚR

V první části práce byly popsány dostupné měřicí systémy pro sportovní účely. Především byly vyzdviženy vlastnosti těchto zařízení ať už ve verzi kabelové, či bezdrátové komunikaci jednotlivých částí. Většina těchto faktů byla z velké části získána z vlastní zkušenosti při používání těchto systému v požárním sportu. Popsána byla také první varianta vlastní časomíry včetně jejich výhod a nevýhod. Byl zhodnocen její dosavadní tříletý provoz.

Na základě získaných poznatků byl navržen nový univerzální časoměrný systém za použití bezdrátového přenosu dat. Důraz byl kladen na mobilitu a jednoduchost výsledné aplikace. Systém také počítá s kompatibilitou mezi jinými dostupnými časomírami a možností rozšíření o další moduly. Zásadním vylepšením oproti ostatním řešením je volba metody časové synchronizace mezi komponenty pro zajištění spolehlivosti a přesnosti měření.

Základními částmi nově navrženého měřicího systému je primární a sekundární jednotka. Primární slouží jako zdroj hlavních hodin pro měření času, který je distribuován jednotce sekundární. Primární jednotka dále zprostředkuje naměřené výsledky na LCD display. Sekundární jednotka sleduje snímací prvky pro ukončení měření a předává informaci jednotce primární. Ta již z rozdílu dvou časů zpracuje výsledek měření.

Požadavky na výsledný produkt stanovily podmínky pro stavbu samotného hardwaru. Mobilita zařízení nutí použití vestavěných akumulátorů. V případě primární jednotky byl zvolen li-ion akumulátor. V sekundární jednotce pak olověný 6 článkový akumulátor. Součástí návrhu jsou i patřičné nabíjecí obvody těchto zdrojů energie a následná úprava napětí pro napájení elektroniky. Na výběr bylo několik variant řešení těchto napájecích modulů popsaných v kapitolách 3.1.5 a 3.2.4. Hlavní částí obou jednotek jsou mikrokontroléry firmy Microchip. Výběr na tyto mikrokontroléry padl díky dostupným vývojovým prostředkům a předešlým zkušenostem s těmito řadiči. V primární jednotce byl použit 16-bitový PIC24FJ256GB206. Jeho vlastnosti jsou popsány v kapitole 3.1.1. Pro sekundární jednotku by zvolen 16-bitový PIC24FJ64GA004 popsaný v kapitole 3.2.1. Volba mikrokontrolérů se ukázala jako dostatečná s patřičnou rezervou umožňující další vývoj zařízení. Součástí návrhu hardwaru byly dále vstupní obvody obou jednotek. Je nutné korektně ošetřit tyto vstupy před možnými nežádoucími stavy vstupujících do zařízení způsobených například i selháním lidského faktoru. Pro bezdrátovou komunikaci byly vybrány komunikační moduly firmy HOPE Microelectronic typu RFM23B pracující s FSK/GFSK modulací na frekvenci 868MHz v ISM pásmu. Modul je popsán v kapitole 2.3.8.

Všechny komponenty navrženého hardwaru byly realizovány a oživeny bez nutnosti razantního zásahu do již vytvořených desek plošných spojů. Při výrobě komponent a jejich uložení do krabiček byl kladen velký důraz na celkovou robustnost a mobilitu zařízení. Popis realizace je uveden v kapitole 4.

Firmware pro primární a sekundární jednotku byl napsán v jazyce C za použití dostupných vývojových prostředků firmy Microchip. Byl aplikován základní komunikační model mezi jednotkami popsaný v kapitole 2.3.4. K měření času bylo využito interního čítače MCU a hlavního 4MHz krystalu. Časová synchronizace byla úspěšně realizována podle postupu uvedeného v kapitole 2.3.7. Cílem firmwaru bylo především otestovat celkovou funkčnost navrženého komunikačního modelu s časovou synchronizací a zajistit základní funkci měření času pro 4 dráhy. Tyto požadavky byly úspěšně splněny. Dosud nebyly prakticky aplikovány některé části hardwaru jako například USB komunikace, SD karta či sériová sběrnice RS-485. Tyto prvky jsou však připravené pro další vývoj zařízení, který bude zcela jistě nadále probíhat.

Pro ověření některých zásadních funkcí časoměrného systému proběhlo několik experimentálních měření uvedených v kapitole 6. Především pak měření výstupní sekundové periody. Výsledky ukázaly drobné nepřesnosti v měření. Odchylka při vypočteném nastavení a použitém 4MHz oscilátoru činila 6,4ms za 1 minutu měření. Po provedení softwarové korekce se odchylka snížila na hodnotu 1,6ms za minutu. Krystal určený k měření času s frekvencí 32,768kHz vykazoval ještě větší odchylku než první varianta měření. Druhou částí měření bylo ověření přesnosti časové synchronizace. Časy se povedlo sjednotit až na rozlišení samotných interních čítačů, které činí 4μs. Výsledky jsou zpracovány v kapitole 6.2. Poslední částí měření bylo zjištění chování vstupních ochranných obvodů časomíry. Předmětem testování byla i reakční doba těchto vstupů na vnější podněty k jejich aktivaci. Výsledek tohoto měření je zpracován v kapitole 6.3.

Projekt rozhodně splnil, až předčil celková očekávání. Především výsledek časové synchronizace byl překvapující. Mírné zklamání způsobil výsledek měření sekundového intervalu, které vykázalo poměrně velkou nepřesnost v měření času. Bude pravděpodobně nutné zapracovat na návrhu kvalitnějšího oscilačního modulu mikrokontroléru. Jinou variantou se nabízí použití GPS modulu, který lze využít jako velmi přesný zdroj reálného času. Při stavbě se jinak nevyskytly žádné zásadní, či těžce řešitelné komplikace. Některé potíže vycházely z nepozornosti při návrhu, ty však byly lehce odhaleny a opraveny. Tyto drobné problémy se týkaly například DC-DC měniče v sekundární jednotce, kde byl použit nevhodný typ kondenzátoru a cívka s velkým sériovým odporem. Závada byla rychle vyřešena náhradou za jiné komponenty. Výsledkem práce je plně funkční hardware, který výrazně převyšuje základní požadavky pro samotné měření času. Tímto je otevřená cesta dalšímu vývoji časoměrného systému, který může být rozšířen o další části.

V dalších krocích dojde k celkovému odladění firmwaru, především pak samotné bezdrátové komunikace, která vykazovala mírné chyby v kolizní přístupové metodě. Za použití pouze dvou navzájem komunikujících jednotek se problém téměř nevyskytuje. Horší situace nastane, pokud primární jednotka bude paralelně komunikovat s více sekundárními jednotkami. Aplikovány budou dále všechny dosud nevyužité periferie jako je sériová sběrnice RS-485, SD karta, která poslouží pro rychlou zálohu naměřených dat a především USB komunikace, která nabídne rozšíření o software zpracovávající naměřené výsledky. Vývoj bude směřován také do hardwaru. Budou vyrobeny různé druhy sekundárních jednotek, například ve variantě pouze s jedním vstupem. Toto rozšíření pomůže zcela eliminovat použití vodičů k připojení samotných snímacích prvků, které mohou být od sebe různě vzdáleny. Taková jednotka bude situovaná co nejblíže koncovému snímači nebo bude přímo do tohoto prvku vestavěna (například do optické závory). Další součástí je externí LED zobrazovač, který bude v následujících etapách též zhotoven. Výsledkem celého projektu by měl být plnohodnotný časoměrný systém použitelný ve skutečné praxi. Předmětem zájmu bude také prozkoumání možností kalibrace oficiálním metrologickým institutem. Tento krok by umožnil použití časomíry pro účely měření času na oficiálních soutěžích.

Literatura

[3] X-flame. *Internetový obchod pro hasiče* [online]. [2012] [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: http://www.x-flame.cz/

[4] TIŠNOVSKÝ, Pavel. Root.cz. *Sběrnice RS-422, RS-423 a RS-485* [online]. [2008] [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: http://www.root.cz/clanky/sbernice-rs-422-rs-423-a-rs-485/#k06

[5] ČTÚ: Využívání vymezených rádiových kmitočtů. *Český telekomunikační úřad* [online]. [2012] [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: http://www.ctu.cz/ctu-informuje/jak-postupovat/radiove-kmitocty/vyuzivani-vymezenych-radiovych-kmitoctu.html

[6] FRYDRYCH, M. Bezdrátová elektronická časomíra s velkým LED zobrazovačem. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 47 s. Vedoucí diplomové práce Ing. David Jaroš.

[7] IXXAT. *IEEE 1588 PTP Introduction* [online]. [2010] [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: http://www.ixxat.com/introduction_ieee_1588_en.html

[8] NOVOBILSKÝ, P. Systém elektronické časomíry pro PS s bezdrátovým připojením terčů a hlavního zobrazovače. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 40s, 2 přílohy. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Háze, Ph.D.

[9] *Český telekomunikační úřad* [online]. [2008] [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: http://www.ctu.cz/

[10] RFM12B wireless FSK transceiver module. *HOPE Microelectronic* [online]. [2006] [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: http://www.hoperf.com/rf/fsk_module/RFM12B.htm

[11] Spáčil J. Komunikační systémy s digitálními modulacemi. Brno: VUT. FEKT. Ústav Telekomunikací, [2008]. 56 s. Vedoucí práce byl Ing. Radim Číž.

[12] RFM23B FSK transceiver. HOPE Microelectronic [online]. [2006] [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: http://www.hoperf.com/rf/fsk_module/RFM23B.htm

[13] Microchip Technology Inc [online]. ©1998-2014 [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: http://www.microchip.com/

[14] Protecting Inputs in Digital Electronics. In: TechZones - Technology News and Products [online]. 2012 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: http://www.digikey.com/us/en/techzone/microcontroller/resources/articles/protecting-inputs-in-digital-electronics.html?

[15] 3.3V Powered, 10Mbps and Slew-Rate Limited, True RS-485/RS-422 Transceivers. Maxim integrated [online]. © 2013 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: http://www.maximintegrated.com/datasheet/index.mvp/id/1079

[16] LTC3441 - High Current Micropower Synchronous Buck-Boost DC/DC Converter. Linear technology [online]. © 2014 [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: http://www.linear.com/product/LTC3441

[17] BQ24070. Texas Instruments [online]. ©1995-2013 [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: http://www.ti.com/product/bq24070

[18] PIC24FJ64GA004. Microchip [online]. [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: http://www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?dDocName=en026375

[19] MCP16301/H: High-Voltage Input Integrated Switch Step-Down Regulator. In: Microchip Technology Inc. [online]. © 2011-2013 [cit. 2014-05-15]. ISBN 978-1-62077-622-3. Dostupné z: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/20005004C.pdf

[20] MCP1700: Low Quiescent Current LDO. In: Microchip Technology Inc. [online]. © 2005-2013 [cit. 2014-05-15]. ISBN 978-1-62077-526-4. Dostupné z: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/20001826C.pdf

[21] MCP1640/B/C/D: 0.65V Start-up Synchronous Boost Regulator with True Output Disconnect or Input/Output Bypass Option. In: Microchip Technology Inc. [online]. © 2011 [cit. 2014-05-15]. ISBN 978-1-60932-829-0. Dostupné z: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22234B.pdf

[22] MCP73831/2: Miniature Single-Cell, Fully Integrated Li-Ion, Li-Polymer Charge Management Controllers. In: Microchip Technology Inc. [online]. © 2005-2013 [cit. 2014-05-15]. ISBN 978-1-62077-260-7. Dostupné z: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc

[23] MCP73837/8: Advanced Stand-Alone Li-Ion / Li-Polymer Battery Charge Management Controller with Autonomous AC-Adapter or USB-Port Source Selection. In: Microchip Technology Inc. [online]. © 2007-2011 [cit. 2014-05-15]. ISBN 978-1-61341-885-7. Dostupné z: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22071B.pdf

[24] LM2941/LM2941C: Low Dropout Adjustable Regulator. In: Texas Instruments Incorporated [online]. ©1999–2013 [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: http://www.ti.com/lit/gpn/lm2941

[25] LM2940-N, LM2940C: 1A Low Dropout Regulator. In: Texas Instruments Incorporated [online]. Copyright © 2000–2013 [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: http://www.ti.com/lit/gpn/lm2940-n

[26] TME: Katalog produktů. *Transfer Multisort Elektronik* [online]. [2014] [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: http://www.tme.eu/cz/details/e2am12kn08wpc12/indukcni-cidla-valcova-dc/omron/e2a-m12kn08-wp-c1-2m/#

[27] Timers. In: Microchip Technology Inc. [online]. ©2006 [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39704a.pdf

[28] Guide to the expression of uncertainty in measurement. 1st ed. 1993. Genève, Switzerland: International Organization for Standardization, 1993, viii, 101 p. ISBN 92-671-0188-9.

Seznam použitých zkratek a termínů

FSK – Frequency-shift keying

GFSK – Gaussian Frequency-Shift Keying

ASK – Amplitde-shift keying

SDH – Sbor dobrovolných hasičů

ISM – Industrial, scientific and medical

LED – Light-emitting diode

PC – Personal computer

PTP – Precision time protocol

MCU – Microcontroler unit

SMD – surface mount technology

ICSP – In circuit serial programming

IR – Infra red

PLL – Phase locked loop

Li-ion akumulátor – lithium iontový akumulátor

DFN – Dual flat no-lead

QFN - Quad flat no-lead

TQFP – Thin Quad Flatpack

LCD – liquid-crystal display

SPI - Serial Peripheral Interface

UART - Universal Asynchronous Receiver/Transmitter

JTAG - Joint Test Action Group

Half-duplex – metoda obousměrné komunikace

Pull-up – zvýšení napětí na vstupním pinu integrovaného obvodu

Timer – časovač

Real-time – hodiny reálného času

CRC - Cyclic redundancy check

MOSFET - Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor

Seznam obrázků

Obrázek 1-komerčně dostupná časomíra [3] 10
Obrázek 2-ukázka řídicí jednotky 1. verze časomíry 12
Obrázek 3-cílová jednotka 1. verze časomíry 13
Obrázek 4-indukčnostní snímač [26] 16
Obrázek 5-příklad externího LED zobrazovače [3] 16
Obrázek 6-komunikační model 17
Obrázek 7-topologie RS-485[4] 19
Obrázek 8-časová synchronizace dle PTP [7] 23
Obrázek 9-bezdrátové moduly RFM23B [12] 24
Obrázek 10-rozdíl mezi FSK a GFSK [12] 25
Obrázek 11-konfigurace připojení RFM23B [12] 26
Obrázek 12 - Komunikační paket bezdrátového modulu[12] 26
Obrázek 13-fyzické rozložení RFM23B [12] 27
Obrázek 14-rozložení pinů MCU primární jednotky [2] 29
Obrázek 15-význam pinů MCU PIC24FJ64GA004 [18] 34
Obrázek 16 - Konektor M12 40
Obrázek 17 - finální podoba primární jednotky 40
Obrázek 18 - vnitřní uspořádání primární jednotky 41
Obrázek 19 - zapojení konektoru M12 - 8 pinů 42
Obrázek 20- zapojení konektoru M12 - 3 piny 42
Obrázek 21 - zapojení XLR konektoru - 5. vstup časomíry 42
Obrázek 22 - finální podoba sekundární jednotky 43
Obrázek 23 - vnitřní uspořádání sekundární jednotky 44
Obrázek 24 - připojení snímacích prvků k sekundární jednotce 44
Obrázek 25 - příklad nulování časovače při shodě s přednastevenou hodnotou [27] .. 46
Obrázek 26 - průběh SPI při zápisu dat do FIFO zásobníku bezdrátového modulu 47
Obrázek 27 - znázornění měření zpoždění vstupního obvodu 53
Obrázek 28 - průběh na vodiči při spínání vstupu primární jednotky 54
Obrázek 29 - průběh na výstupu vstupního modulu primární jednotky 54

Seznam schémat

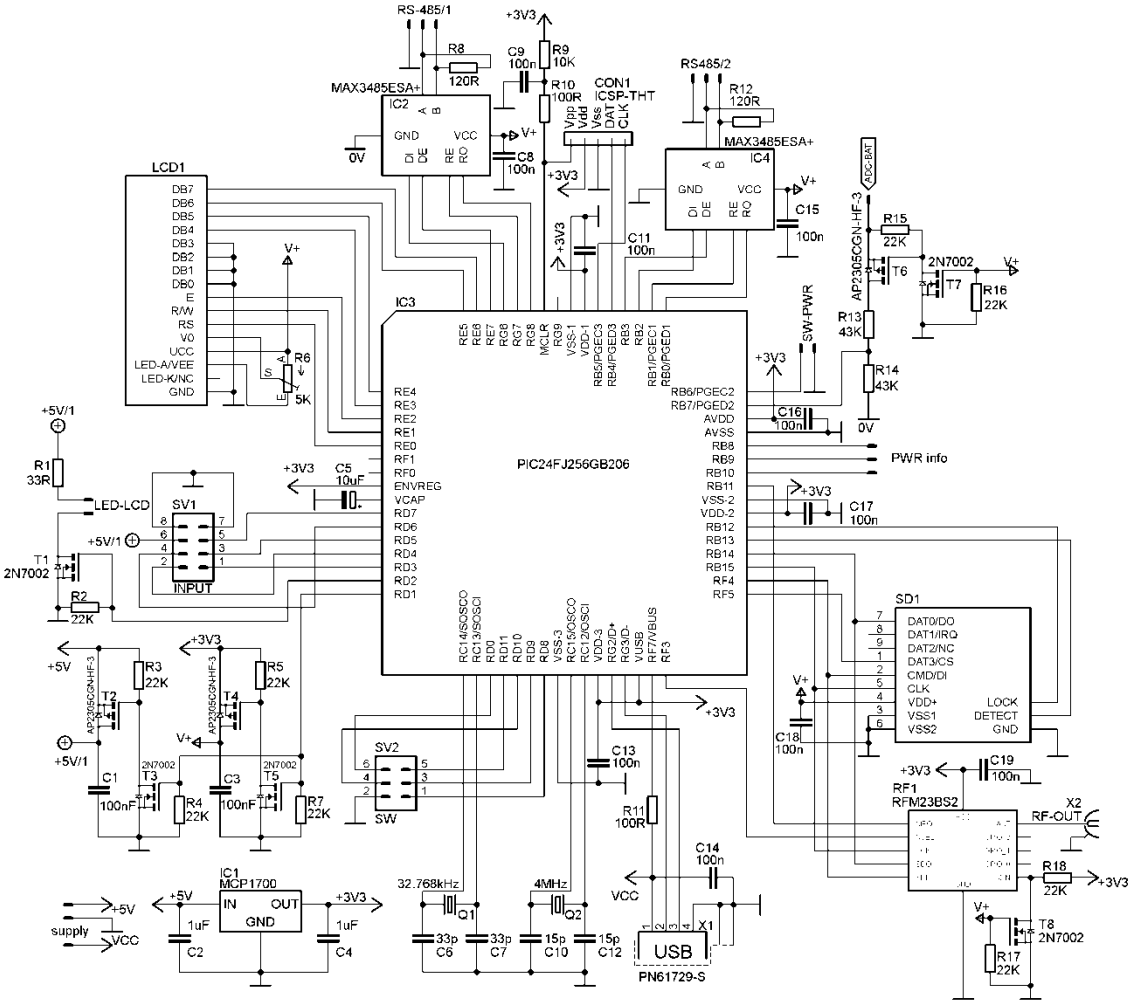
Schéma 1-výstup indukčnostního snímače [2] 16
Schéma 2-vstupní obvod primární jednotky 30
Schéma 3-vstupně výstupní modul sekundární jednotky 36

Seznam tabulek

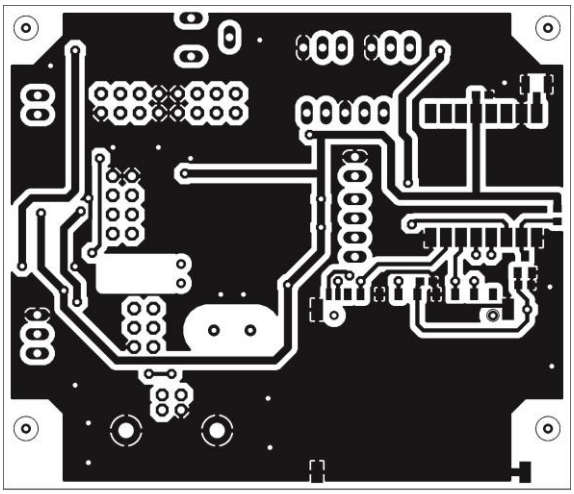
Tabulka 1-souhrn parametrů sběrnice RS-485[4] 18
Tabulka 2-přehled dostupných frekvenčních pásem na území ČR [5] 20
Tabulka 3-význam pinů modulu RFM23B 27
Tabulka 4-přehled parametrů MCU primární jednotky [2] 28
Tabulka 5 - měření periody 1s na výstupu mikrokontroléru 50
Tabulka 6 - výpočet nejistoty pro měření periody 1s [28] 51
Tabulka 7 - měření synchronizace časů 52
Tabulka 8 - hodnoty měření vstupních obvodů 52

Přílohy

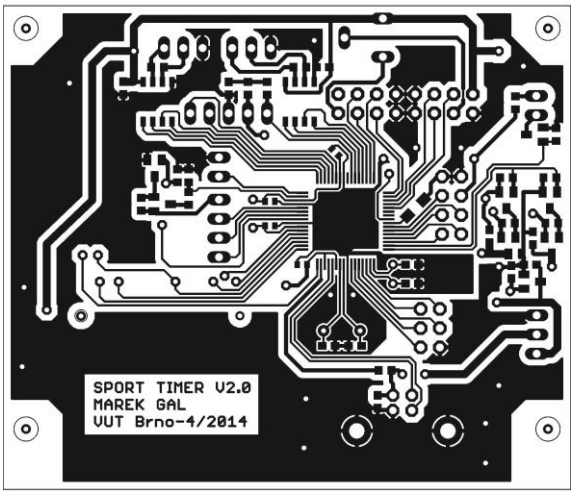
Příloha 1 *– schéma desky s MCU primární jednotky*



Příloha 2 *- deska plošného spoje s MCU primární jednotky (měřítko 1:1)*

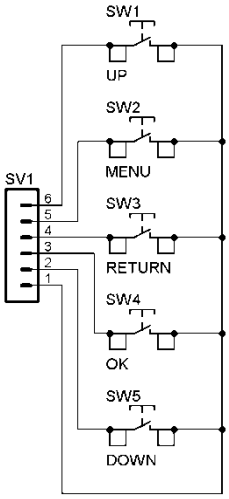


Horní vrstva

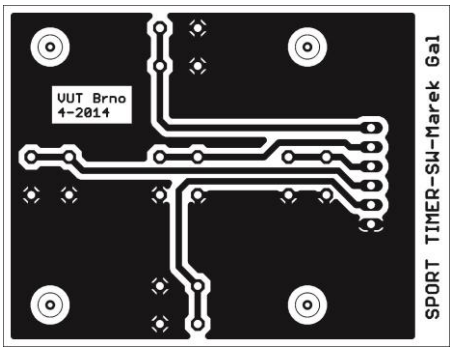


Spodní vrstva

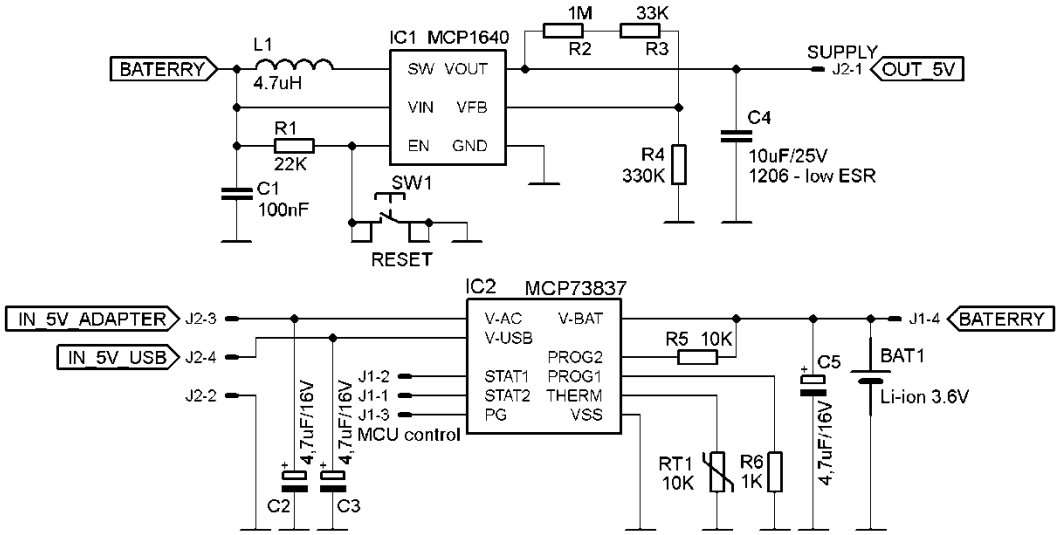
Příloha 3 *- schéma modulu s tlačítky primární jednotky*



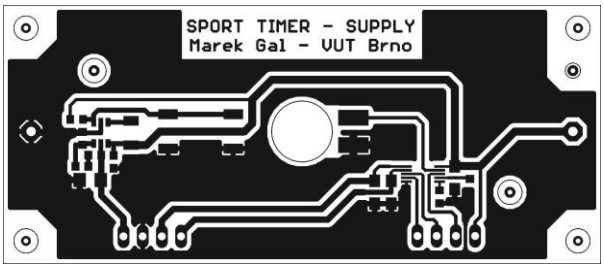
Příloha 4 *- deska plošného spoje modulu s tlačítky (měřítko 1:1)*



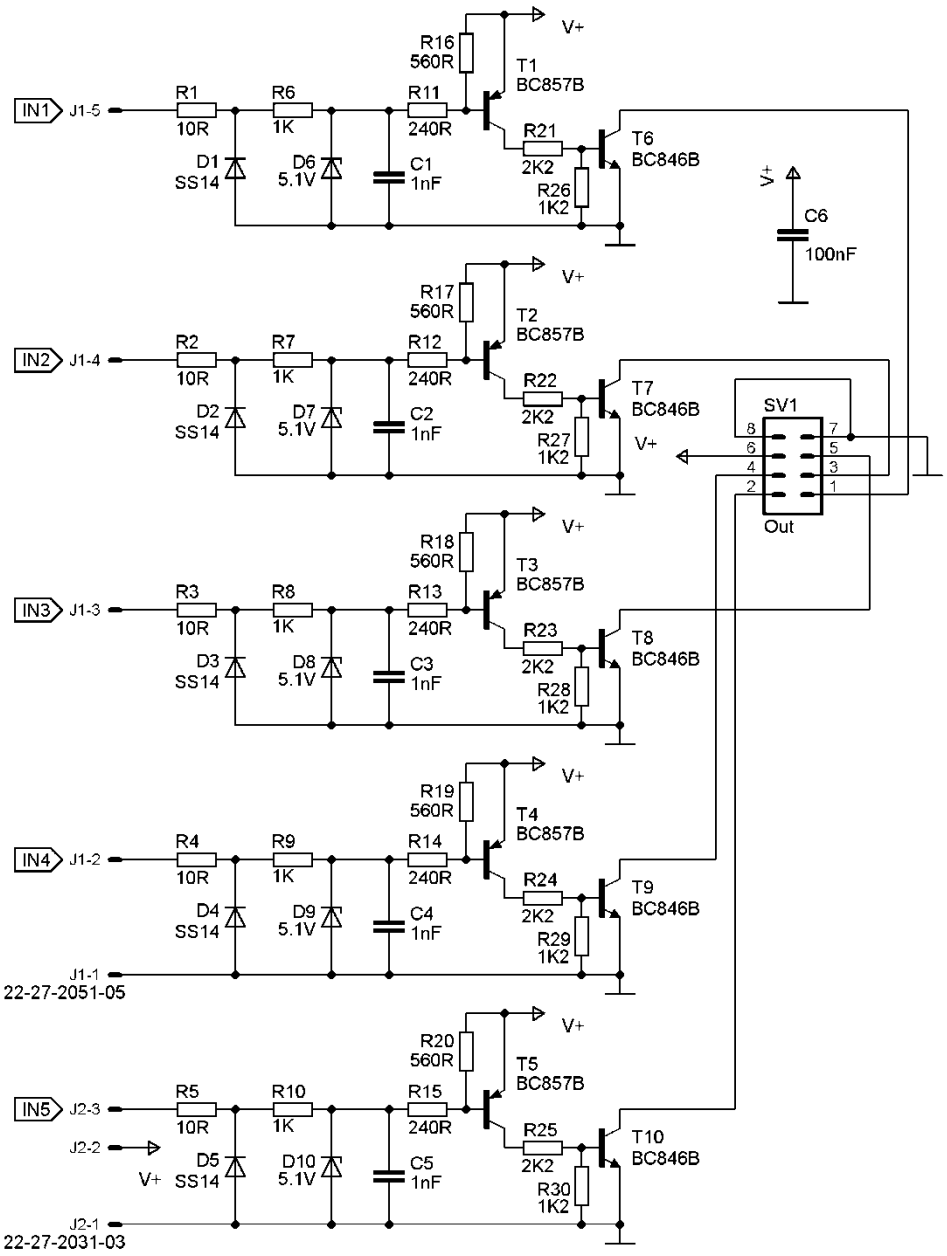
Příloha 5 *- schéma napájení primární jednotky*



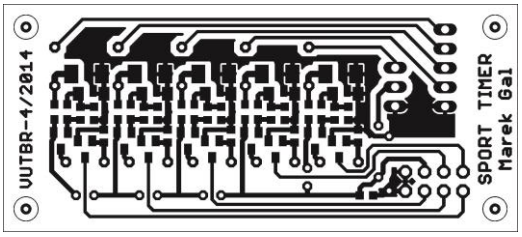
Příloha 6 *- deska plošného spoje modulu napájení primární jednotky (měřítko 1:1)*



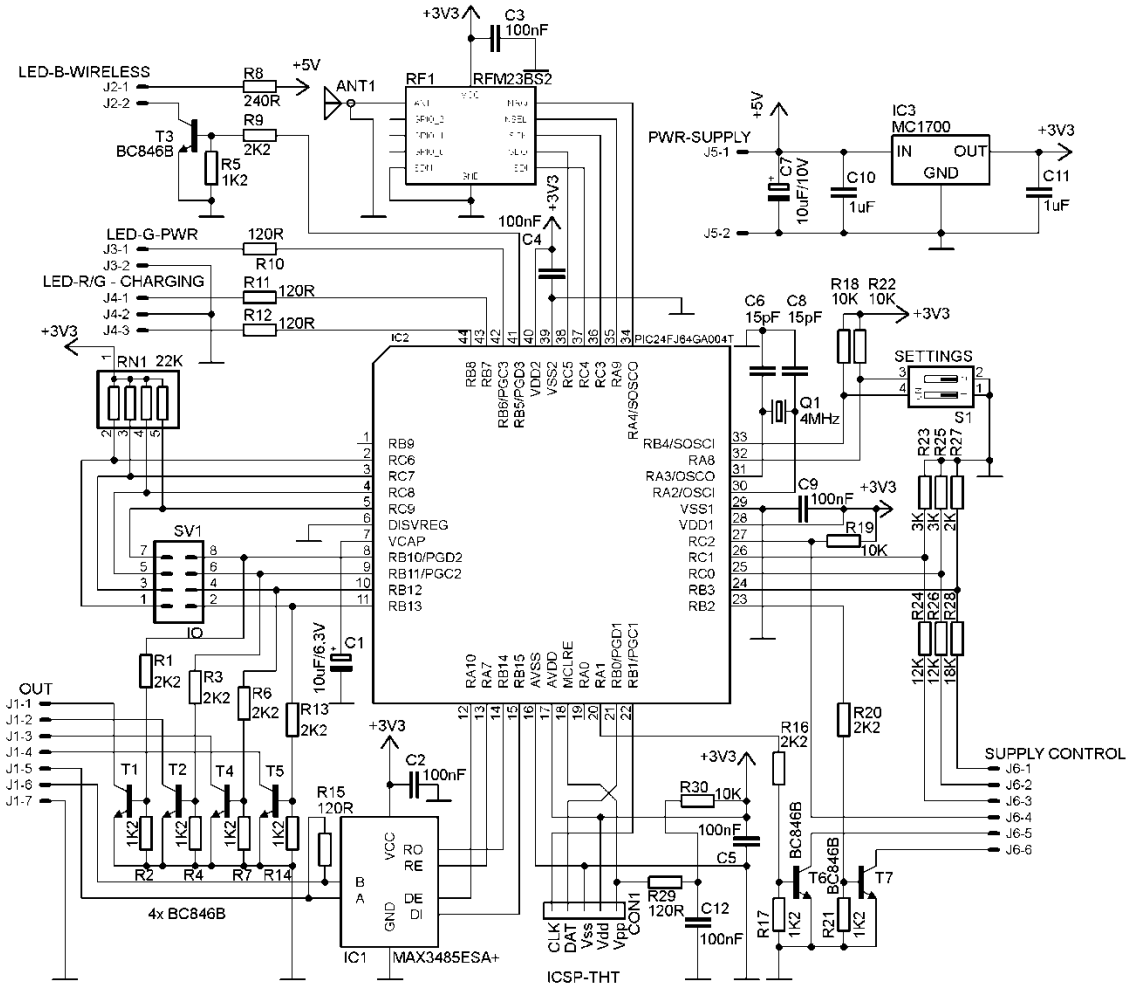
Příloha 7 *- schéma vstupného modulu primární jednotky*



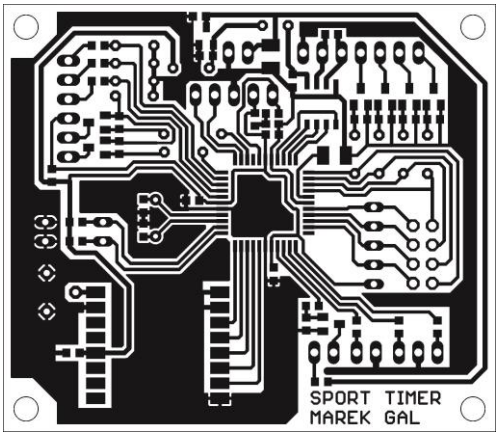
Příloha 8 *- deska plošného spoje vstupního modulu primární jednotky (měřítko 1:1)*



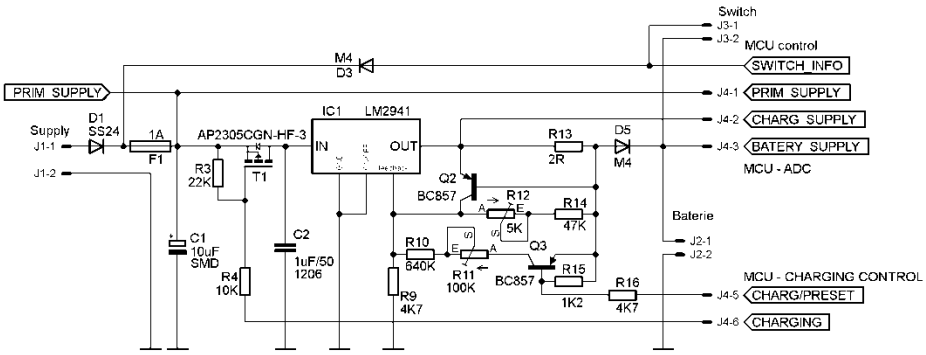
Příloha 9 *– schéma desky s MCU sekundární jednotky*



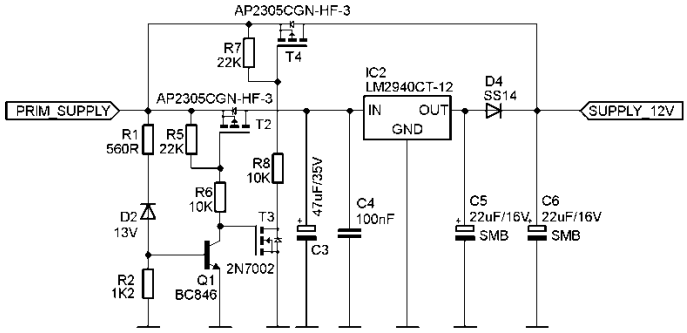
Příloha 10 *- deska plošného spoje sekundární jednotky (měřítko 1:1)*



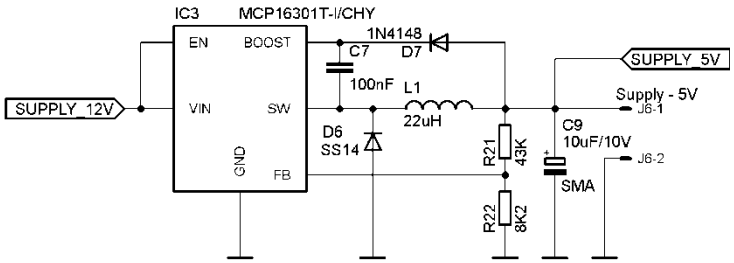
Příloha 11 *- schéma napájecího modulu sekundární jednotky - nabíjecí část*



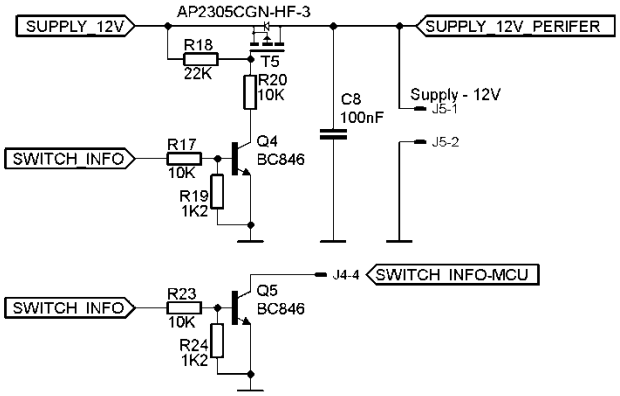
Příloha 12 *- schéma napájecího modulu sekundární jednotky - stabilizační část*



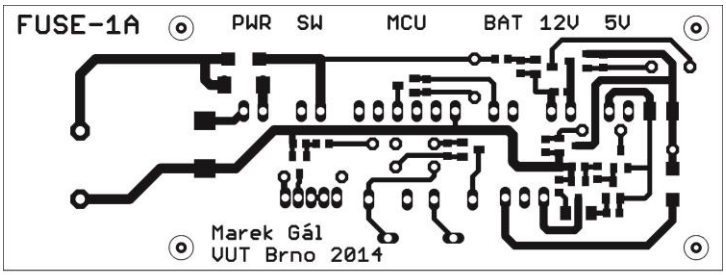
Příloha 13 *- schéma napájecího modulu sekundární jednotky - snižující měnič*



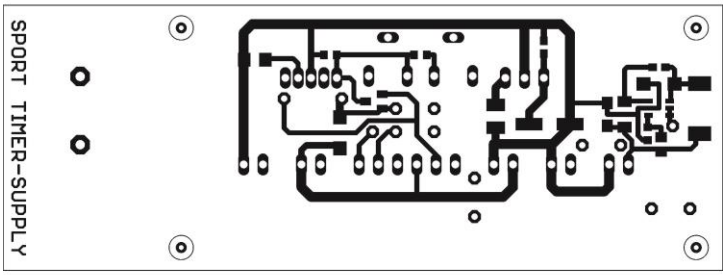
Příloha 14 *- schéma napájecího modulu sekundární jednotky - oddělení napájení*



Příloha 15 *- deska plošného spoje napájení sekundární jednotky (měřítko 1:1)*

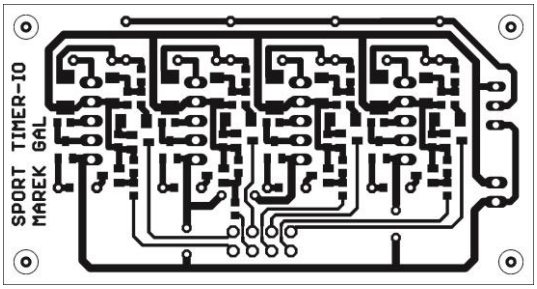
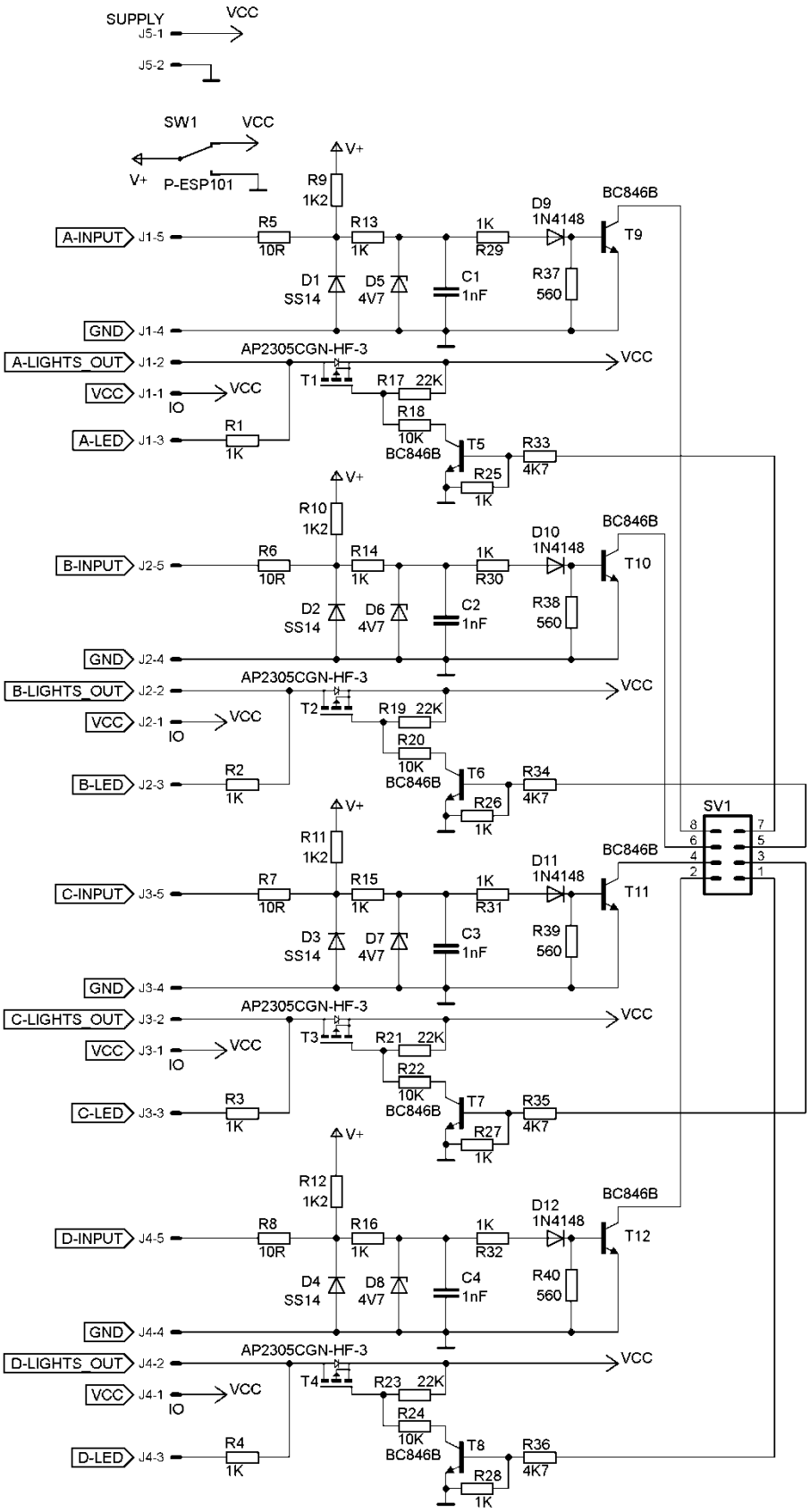


Spodní vrstva



Horní vrstva

Příloha 16 *- deska plošného spoje IO modulu sekundární jednotky (měřítko 1:1)*



Příloha 17 *- schéma IO modulu sekundární jednotky*