



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická
Katedra řídicí techniky

Bakalářská práce

**Měření teploty a tlaku uvnitř pneumatiky
závodního vozu**

Jakub Štol

Studijní program: Kybernetika a robotika

Studijní obor: Systémy a řízení

Vedoucí práce: Ing. Jan Sobotka

Praha 2014

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

.....

Jakub Štol

Abstrakt

Cílem této práce bylo navrhnout a realizovat zařízení schopné měřit teplotu a tlak uvnitř pneumatiky. Návrhu předcházely průzkum komerčně dostupných produktů, specializovaných na měření veličin v pneumatice a porovnání jejich parametrů s parametry požadovanými.

V úvodní kapitole je popsána motivace pro stavbu zařízení a očekávané výsledky. V následující kapitole je uveden krátký výčet komerčně prodávaných výrobků spolu s jejich výhodami i nevýhodami. Ve třetí kapitole je popsána sběrnice SPI a I²C, která je v projektu použita. Čtvrtá kapitola obsahuje výběr komponent spolu s parametry výběru a návrhem zařízení. V následující kapitole je nastíněna softwarová část projektu a způsob komunikace mezi zařízeními. V poslední kapitole je ukázána funkčnost zařízení a uvedeny výsledky z měření. V závěru je nastíněno pokračování projektu a zhodnocení výsledků.

Abstract

The goal of this work was to design a tire monitoring system, which could measure a pressure and a temperature inside of a tire. Before the implementation a brief survey of commercial products and a comparison of its parameters have been done.

In the introduction there's a brief discussion of a system usage and what its realization can bring. In second chapter there is a description of commercial products along with their pros and cons. In third chapter is a brief description of SPI and I²C bus. The next chapter consists of a component selection process along with a hardware assembly. Fifth chapter is focused on software and communication. Final chapter consists of an experiment along with a demonstration of functionality. In conclusion there is a project's result's evaluation and possible future improvements.

Děkuji Ing. Janu Sobotkovi, Bc. Aleši Svobodovi a doc. Ing. Jaroslavu Roztočilovi, CSc. za odborné vedení, věcné připomínky a cenné rady, které mi pomohly tuto práci realizovat. Dále děkuji celé své rodině za trpělivost a plnou podporu při studiu.

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Komerční produkty	2
2.1	Příklady komerčních produktů	2
2.1.1	Stack TPMS	2
2.1.2	MPXX8XXXD	3
2.1.3	HawksHead Moto Track 4	4
2.2	Vlastní návrh.....	5
3	Sběrnice SPI a I ² C	7
3.1	Sběrnice Serial Peripheral Interface	7
3.2	Sběrnice Inter-Integrated Circuit.....	8
3.3	Měření tlaku v integrovaných senzorech	10
4	Hardware.....	12
4.1	Parametry širšího výběru komponent	12
4.2	Konkrétní součástky	13
4.2.1	STM32VLDISCOVERY	13
4.2.2	Senzor SP100-7A	13
4.2.3	Mikroprocesor ATMEGA328P.....	15
4.2.4	Bezdrátový modul CC2500	15
4.2.5	Napájení.....	17
4.2.6	Displej MC2004B/SBL/H	18
4.2.7	SD karta	20
4.3	Výsledné moduly a uchycení v pneumatice.....	20
5	Software	23
5.1	Inicializace STM32vldiscovery	23
5.2	Zápis na kartu SD	24
5.3	Displej a komunikace s uživatelem	24
5.4	Průběh komunikace centrálního modulu.....	26
5.5	Modul v pneumatice vozu	28
5.6	Zobrazení dat.....	29
6	Experiment	31
7	Závěr	34
	Citovaná literatura.....	35

Přílohy.....	37
Seznam obrázků	44
Seznam tabulek	45
Obsah CD	46

1

Úvod

V závěrečné práci svého bakalářského studia jsem se rozhodl zapojit do týmu CTU CarTech, a to realizací některého z nabízených projektů. Zvolil jsem projekt měření teploty a tlaku uvnitř pneumatiky závodního vozu, protože rád realizuji hardwarová zařízení.

Mým úkolem bylo navrhnout měřící aparaturu, která by se umístila do pneumatiky, měřila by tlak a teplotu a tato data zobrazovala na displeji a zároveň ukládala do externí paměti. Naměřené hodnoty by posloužily pro zjištění, jak se pneumatika za jízdy chová, jak se mění její vnitřní teplota a tlak. Nesprávný tlak v pneumatice může způsobit adheze pneumatiky a zhoršení přenosu sil mezi vozidlem a vozovkou. Zároveň rozdílné tlaky v levé a pravé pneumatice nápravy mohou ovlivnit chování vozu. Členové týmu měřili do této doby tlak v pneumatice ručním manometrem. Měření tlaku tímto způsobem je možné pouze na stojícím vozidle.

V případě, že senzor bude schopný měřit větší rozsah tlaku (do sedmi barů), mohl by být výrobek umístěn i do tlumičů, kde by obdobně jako v pneumatice měřil změnu tlaku oproti počátečnímu nastavení.

2

Komerční produkty

Zadáním této části bakalářské práce bylo navrhnout způsob a zařízení, schopné měřit teplotu a tlak uvnitř pneumatiky. Navrhované zařízení musí splňovat parametry, jako jsou minimální rozměry a hmotnost, chyba měření, nízká cena atd. Maximální chyba měření byla stanovena po dohodě na 10 kPa.

Samotnému návrhu předcházely průzkumy komerčně dostupných zařízení. Velká část těchto zařízení, určených převážně do osobních aut, měří pouze tlak v pneumatice, teplotu nikoliv. Tlak často není odečítán v žádných jednotkách – zobrazena je pouze varovná kontrolka při překročení prahové hranice.

Některá vozidla odečítají tlak i teplotu a tyto veličiny zobrazují na palubním displeji. Nevýhodou instalovaných senzorů bývá absence jakéhokoliv nastavení, jako je například perioda vzorkování. Při průzkumu komerčních produktů jsme se tedy soustředili převážně na poloprofesionálně a profesionálně orientované produkty.

2.1 Příklady komerčních produktů

2.1.1 Stack TPMS

Stack TPMS je profesionální, komerční zařízení pro motoristické závodníky. Sada obsahuje čtyři senzory, čtyři antény, zobrazovací jednotku a centrální zařízení, schopné uchovávat data a následně je odeslat do počítače viz Obr. 2.1.

Senzory umístěné v pneumatice mají malou hmotnost, rozměry a komunikují s centrálním modulem bezdrátově. Nevýhodou bezdrátové komunikace v této formě je použití čtyř antén, které zvyšují hmotnost vozidla. Napájení senzorů je řešeno bezdrátově, což zaručuje dlouhý provoz bez nutnosti výměny baterie a s tím spojených problémů se zouváním pneumatik. Nevýhoda této sady je cena. Pro účely CTU CarTech je poměrně vysoká.

Parametry zařízení (viz Tab. 2.1) převzaty z datasheetu [1].



Obr. 2.1 Ilustrační fotografie ST9351 [1]

Tab. 2.1 Parametry Stack TPMS

Senzor ST9308		
	Rozsah měření teplot	20°C – 125°C
	Chyba měření tlaku	±1°C
	Rozsah měření tlaku	0-45 PSI
	Chyba měření tlaku	±0.125 PSI
	Hmotnost senzoru	15 g
	Rozměry senzoru	4 x 1,5 x 2 cm
	Cena	cca 6 300 K
Dual-band antenna		
	Hmotnost senzoru	15 g
Centrální modul ST9318		
	Maximální frekvence měření	10Hz
	Komunikace	CAN bus
	Hmotnost	140 g
	Orientační celková cena	55 440 Kč¹

2.1.2 MPXX8XXD

Nejedná se o soupravu pro měření tlaku, jako v případě Stack TPMS, ale o soustavu měřících senzorů, obsažených v jednom malém pouzdře. Integrovaný obvod obsahuje mikroprocesor, malou paměť, rádiový transceiver a senzor

¹Cena zařízení podle serveru Auto-Moto Riegger s.r.o.

zrychlení ve dvou osách. Nevýhodou této součástky je obtížný způsob programování, implementace a nedostatečné podklady o programátoru zařízení.

Tab. 2.2 Parametry MPXX85XXD

MPXX85XXD	
Rozsah měření teplot	-45°C – 130°C
Chyba měření tlaku	±1°C
Rozsah měření tlaku	100 - 450 kPa
Chyba měření tlaku	± 0,688 kPa
Hmotnost senzoru	0,45 g
Rozměry senzoru	9 x 9 x 2.3 mm
Cena	85 Kč

2.1.3 HawksHead Moto Track 4

Hawkshead Moto Track 4 je souprava pro měření teploty a tlaku v pneumatikách. Jednotlivé verze tohoto systému obsahují různé rozsahy měřeného tlaku a také různý počet senzorů. Pro ilustraci byla vybrána sada, jejíž rozsah měření odpovídá požadavkům práce.

Tab. 2.3 Parametry HawksHead Moto Track 4

HawksHead Moto Track 4	
Rozsah měření teplot	-40°C – 85°C
Chyba měření teploty	±3°C
Rozsah měření tlaku	0-350 kPa
Chyba měření tlaku	± 10,3 kPa
Hmotnost senzoru	12 g
Rozměry senzoru	21 x 21 mm
Cena	4250 Kč

Ani tato sada neodpovídá požadavkům. Důvodem je velká chyba měření teploty a tlaku a to i vzhledem k malému rozsahu měření. Zároveň pro naše účely není praktické měření teploty vně pneumatiky (na ventilku kola). Teplota, měřená ve ventilku kola, může mít jinou dynamiku změny, než uvnitř pneumatiky. Nevýhodou vnějšího umístění senzoru je nutnost jeho demontování v případě, že by během jízdy bylo nutno změnit tlak v pneumatice a poté ho opět připevnit. Informace o zařízení (viz Tab. 2.3) převzaty z instrukčního souboru [2].

Ze všech nalezených zařízení zde byla uvedena ta, která splňovala nejvíce kritérií potřebných pro realizaci této práce.

2.2 Vlastní návrh

Vlastní měřící zařízení bude složeno z několika dílčích částí, které jsou popsány v blokovém diagramu Obr. 2.2.

Napájení

Napájení modulu lze řešit několika postupy: napájení malou, tzv. knoflíkovou baterií, která má hmotnost několik gramů. Kapacita knoflíkových baterií se pohybuje od 5mAh až po hodnoty v řádu stovek mAh. Další možností je využití napájení například z elektromagnetického vlnění.

Mikropočítač

Účelem tohoto mikroprocesoru bude zpracovat požadavek, přijmout data z obou senzorů a odeslat změřené veličiny bezdrátově do přijímače umístěného v centrální jednotce.

Senzor teploty a tlaku

Výběr senzoru je klíčový pro dosažení optimálního výsledku. Chybná volba senzoru může způsobit velkou chybu měření nebo velkou hmotnost a rozměry návrhu.

Vysílač a přijímač

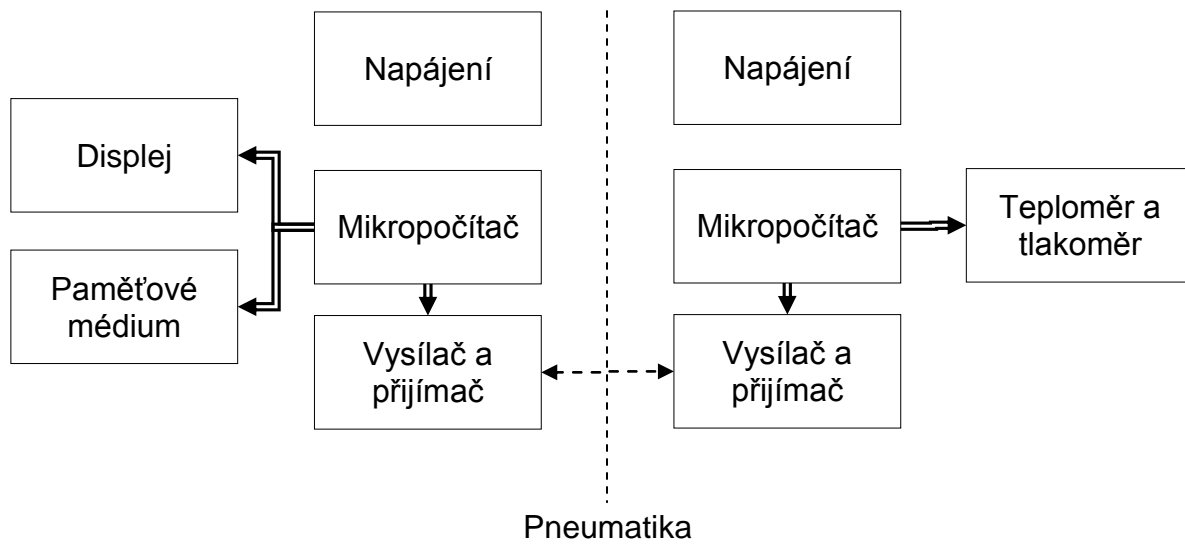
K vysílání a přijímání příkazů a dat bude použit jednoduchý RF přijímač a vysílač. Tento vysílač by měl mít malou spotřebu a možnost úpravy parametrů vysílání. Parametry vysílání jsou například rychlost vysílání dat, modulace, kanál, apod.

Mikropočítač v centrální jednotce

Tento mikroprocesor by zpracovával přijatá data ze všech čtyř senzorů v pneumatikách a následně by je ukládal na vyjímatelné paměťové médium, jako je USB flash disk nebo SD karta. Přijatá data by měla být zobrazena na displeji.

Displej

K zobrazení naměřených dat v reálném čase, k nastavení a zahájení komunikace, bude použit jednoduchý displej. Displej musí být dobře čitelný a kontrastní, protože bude použit při měření i při přímém slunečním svitu.



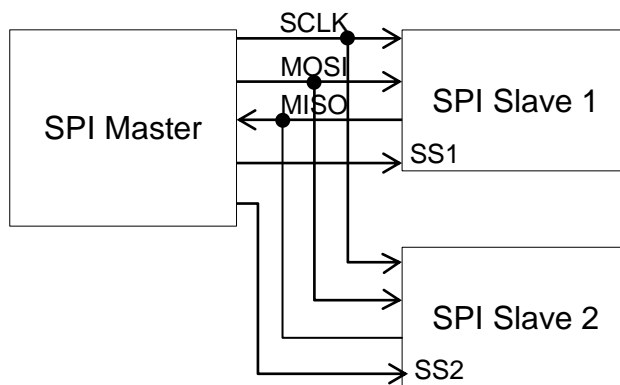
Obr. 2.2 Blokové schéma senzoru

3

Sběrnice SPI a I²C

3.1 Sběrnice Serial Peripheral Interface

Sběrnice Serial Peripheral Interface (dále jen SPI) funguje na principu komunikace Master-Slave, ovšem na rozdíl od sběrnice I²C, která používá pouze dva obousměrné vodiče (datový a hodinový), SPI používá vodičů více. Je to vodič přenášející hodinový pulz (dále jen SCLK) generovaný masterem a vodič Master Out-Slave In (dále jen MOSI) přenášející data od mastera ke slave zařízení. Třetí vodič, Master In-Slave Out (dále jen MISO), přenáší data v opačném směru. Protože vstup i výstup mastera je připojen ke všem slave zařízení zároveň, komunikace jednotlivých členů je povolována a řízena vodičem Slave Select (dále jen SS). Podle literatury je tento vodič označován někdy jako Chip Select (dále jen CS). SS vodičů je stejný počet jako účastníků komunikace připojených na tuto sběrnici. Základní schéma zapojení tří komunikujících zařízení je popsáno v obrázku Obr. 3.1.



Obr. 3.1 Blokové schéma sběrnice SPI

Při návrhu komunikace je nutno dodržovat správnou polaritu a fázi hodinového signálu a zároveň zajistit čtení a zápis dat na správnou hodinovou hranu. Kombinace polarit a fází hodinového a datového signálu, stejně jako další konvence sběrnice, jsou specifikovány v dokumentaci od společnosti Freescale Semiconductor (dříve Motorola) v dokumentu „Freescale’s SPI Block Guide“. [3].

Tab. 3.1 Pojmenování a označení fází datového a hodinového signálu

Mód ²	CPOL	CPHA
0	0	0
1	0	1
2	1	0
3	1	1

Podrobný časový diagram SPI sběrnice je k dispozici v Příloha 1.

Komunikace účastníků po sběrnici probíhá následovně. V okamžiku zahájení komunikace master členem se sepne u zařízení, připojeného na sběrnici, signál SS do logické 0. Po časové prodlevě, která je specifická pro každé zařízení, začne master vysílat data. Dat je vždy n-násobek 8, standardně pak 8 či 16 bitů. Některá zařízení, jako například modul CC2500 využitý v další části práce, používá 16-ti bitovou verzi. Prvních 8 bitů je označováno jako control bits a slouží pro specifikaci adresy registru, ze kterého budou následně data čtena nebo zapisována. Druhých osm bitů obsahuje data. Výhodou sběrnice SPI je, že master může data vysílat i přijímat zároveň. Komunikace se zařízením je ukončena nastavením signálu SS na log1. V případě, že zpracování dotazu není okamžité, vyše master po uplynulém intervalu novou zprávu bez dat.

Vysoká logická úroveň na sběrnici je zajištěna připojením rezistoru mezi datové vodiče a kladné napájení. Hodnota rezistoru se liší v závislosti na rychlosti přenosu dat. Bez tohoto odporu nemusí komunikace správně fungovat.

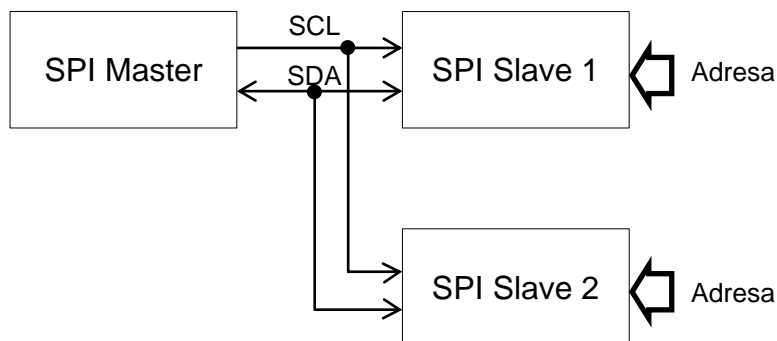
3.2 Sběrnice Inter-Integrated Circuit

Často je tato sběrnice označovaná jako IIC nebo také I²C. I²C využívá dva vodiče, datový Serial Data (dále jen SDA) a hodinový Serial Clock (dále jen SCL). Před započítím komunikace jsou oba vodiče nastaveny na klidovou hodnotu, tj. log1. Většina aplikací vyžaduje definované logické stavy. Vysoká logická úroveň je zajištěna připojením rezistoru s odporem kolem 10kΩ mezi sběrnici a napájecí napětí podobně, jako v případě SPI.

V okamžiku zahájení komunikace masterem, je nastavena log0 na vodič SDA. Okamžik, kdy je SCL v log1 a SCK v log0, je definován jako start bit. Start bit je registrován všemi zařízenými připojenými na sběrnici. Master poté vyše jeden byte dat. Ta mohou být již přímo daty nebo příkazem, většinou se ale jedná o adresu

² Varianty sběrnice bývají označovány jako „módy“ a tato konvence je používána v programu knihovny procesoru ATMEGA, který je použit v praktické části práce.

cílového zařízení. Každé zařízení má svou unikátní adresu, nastavitelnou pomocí externích pinů součástky. Adresa je 7 bitů dlouhá, v novějších verzích existuje i rozšířená varianta 10 bitové adresy. Za adresou je umístěn read-write bit, indikující, zda se bude jednat o čtení či zápis. Detailní časový diagram komunikace je k dispozici v Příloha 2.



Obr. 3.2 Blokové schéma sběrnice I²C

Po dokončení odeslání bloku dat následuje potvrzující bit, tzv acknowledge (dále jen ACK). ACK je na místě, kde by se nacházel devátý bit dat. Tento bit je generován příjemcem zprávy a potvrzuje tímto vysílajícímu zařízení bezchybné přijetí zprávy. Pokud proběhl příjem bez chyb, je na výstupu přivedena log0, logická 1 značí chybu příjmu. Následuje dalších 8 bitů dat potvrzené opět ACK bitem. Komunikace se zařízením je ukončena stop bitem, který je generován přechodem z log0 do log1 na SDA vodiči, přičemž SCL je v log1.

Původní maximální rychlost povolená sběrnici, byla 100kbit/s. S příchodem modernějších technologií byly na I²C kladeny stále větší nároky na její rychlost. Rychlosti komunikace byly proto zvýšeny a rozděleny do několika kategorií. Každé zařízení povoluje určité pásmo rychlostí, které je specifikováno v dokumentaci dané součástky. Rychlostní varianty sběrnice jsou:

- Standart-mode – rychlost do 100kbit/s
- Fast-mode – s rychlostí do 400kbit/s
- Fast-mode Plus – omezené do 1Mbit/s
- High-speed mode – s maximem do 3,4Mbit/s

Pro jednosměrný přenos dat existuje varianta Ultra Fast-mode s maximální rychlostí přenosu až 5Mbit/s.

Veškeré informace o této sběrnici jsou k dispozici v oficiálním manuálu tvůrců sběrnice I²C firmy NXP Semiconductors [4]. Některé informace byly převzaty z webové stránky www.hw.cz [5].

3.3 Měření tlaku v integrovaných senzorech

Střední tlak je definován jako tlak působící na plochu.

$$p = \frac{F}{S} \quad (1)$$

V případě nerovnoměrně působícího tlaku, například působí-li tlak pouze v nějakém bodě, používáme rovnici:

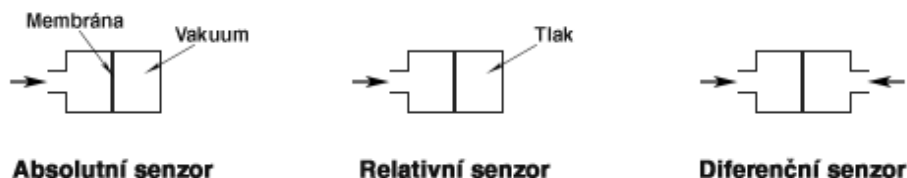
$$p = \frac{dF}{dS} \quad (2)$$

,kde p je tlak, F je síla a S je plocha ve čtverečních metrech. Jednotka tlaku je 1 Pascal. V některých částech této práce je uvedena jednotka 1 Bar, která se často ve spojitosti s automobily používá. Převodní poměr veličin je $1 \text{ Bar} = 10^5 \text{ Pa}$.

Jedním ze způsobů měření tlaku v integrovaných senzorech, je použití tenkého křemíkového členu - membrány. Membrána je uchycena v epoxidovém pouzdře. Tvar pouzdra (viz Obr. 3.3) se liší v závislosti na referenci, ke které senzor tlak měří. Druhým, v integrovaných obvodech nejpoužívanějším, typem senzoru jsou integrovaná mikrozařízení, označovaná jako MEMS. Na čipu se nachází senzor tlaku, teploty a mikroprocesor, často s A/D převodníkem.

Senzory dělíme na tři skupiny:

- Absolutní senzory tlaku - měří tlak proti nulovému tlaku vakua
- Relativní senzory tlaku - měří tlak oproti nějakému tlaku, nejčastěji atmosférickému
- Diferenční senzory tlaku - měří rozdíl dvou přivedených tlaků

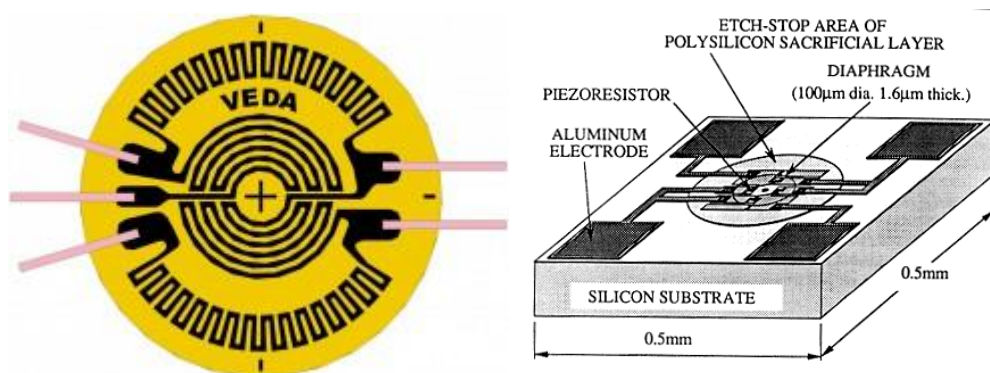


Obr. 3.3 Konstrukce membránových senzorů tlaku

V senzorech se tlak měří třemi základními způsoby:

- Piezoelektrickým jevem – Vznik napětí po aplikaci síly
- Změnou odporu vodiče při aplikování síly (tenzometry)
- Změnou kapacity mezi dvěma deskami kondenzátoru.

Měření tlaku pomocí změny odporu vodiče, je použito v MEMS senzoru tlaku SP100-7A, který je použit v další části této práce. Na povrchu křemíkové desky je v měřicí části nanесena tenká vrstva vodivého materiálu. Je-li na senzor aplikován tlak, dojde ke změně odporu materiálu a na svorkách se změní napětí. Podobný princip je použitý i při měření síly pomocí tenzometrických můstků. Sensory, nanесené v MEMS i membráně, jsou zapojeny jako můstek s celomostovým zapojením. Toto zapojení zvyšuje citlivost na deformaci senzoru až čtyřnásobně. Z obrázku Obr. 3.4 je patrné, že dva tenzory (na okraji), nanесené na rozetě, měří radiální složku napětí a dva (uprostřed) měří složku tangenciální.



Obr. 3.4 Fóliová rosetta, membrána [6] a MEMS senzor [7]

Tenzometrický můstek, nanесený na membráně nebo v integrovaném obvodu, nemá ideální chování. Při kolísání srovnávacích teplot, dochází ke změně výstupního napětí. Ke snížení závislosti výstupního napětí na teplotě se používá tenkostěnný křemíkový senzor teploty a jím naměřená teplota ke kompenzaci výstupního napětí.

Informace převzaty z [8] a [9].

4

Hardware

4.1 Parametry širšího výběru komponent

Mikropočítač v pneumatice musí splňovat několik požadavků. Pro konkrétní realizaci tohoto zařízení byly vybrány tyto hlavní určující faktory:

- hmotnost
- spotřeba proudu
- malé požadované napětí
- velikost pouzdra
- existence I²C sběrnice nebo jiného vhodného rozhraní

Parametry, jako velikost programové paměti, nebyly prozatím do úvah zahrnovány. Vycházíme z předpokladu malé paměťové náročnosti programu.

Následuje výběr senzorů teploty a tlaku. Těchto senzorů existuje velké množství, proto není možné vypsát všechny vhodné součástky, které prošly výběrem. Existují i senzory obsahující v jednom pouzdře senzor tlaku i teploty. Z důvodu budoucí úspory místa bude preferován tento typ senzoru. Preferovaný způsob komunikace se senzorem je po sběrnici, přesto byly do úvah zahrnuty senzory komunikující analogově. Změna napětí u těchto senzorů je malá, v řádech milivoltů, proto byl výběr analogově komunikujících senzorů omezen na senzory s integrovaným operačním zesilovačem. Důležité parametry určující výběr senzorů jsou:

- 0.5 Bar až 3.5 Bar relativního tlaku
- Absolutní senzor tlaku
- Chyba měření teploty maximálně $\pm 3^{\circ}\text{C}$
- Cena
- Způsob komunikace (I²C, SPI, změna napětí)
- Tepelná kompenzace senzoru tlaku
- Rozměry
- Hmotnost
- Napájení a odběr proudu

Komunikace mezi senzorem v pneumatice a centrální částí bude probíhat bezdrátově. Vybráno bylo použití rádiových vln v pásmu velmi krátkých vln (VHF)

nebo ultra krátkých vln (UHF). Výhodou rádiových vysílačů bude dosah vysílání a z toho plynoucí nezávislost polohy senzoru v pneumatice vůči poloze přijímače ve vozidle. Při použití více vysílačů se stejnou frekvencí, bude nutné komunikaci řídit, aby nedocházelo ke kolizím při vysílání. Výběr vysílací frekvence je podmíněn zákony České republiky. Užívání rádiového spektra je upraveno v zákoně č. 127/2005 Sb. Parametry určující výběr rádiových modulů:

- Rozměry
- Velikost antény
- Vysílací a přijímací výkon
- Komunikace po sběrnici
- Frekvence
- Hardwarová podpora vysílání rámců a všeobecná nastavitelnost komunikace

4.2 Konkrétní součástky

Z databáze vybraných komponent byly vybrány následující součástky. Jejich funkčnost byla odzkoušena v nepájivém poli a následně byly osazeny na plošný spoj.

4.2.1 STM32VLDISCOVERY

Tento vývojový modul od společnosti STMicroelectronics používá 32-bitový mikroprocesor Cortex-M3. Tým CTU CarTech tyto procesory v aplikacích používá, proto byl použit i v tomto projektu. Součástí vývojové sady je programátor STLink, zjednodušující nahrávání a ladění programu. STM32 je napájen 5V přímo z USB konektoru, přestože sám používá logiku 3,3 voltovou. K programování procesoru bude použit program Atollic Truestudio, který je založený na známé vývojové platformě Eclipse.

4.2.2 Senzor SP100-7A

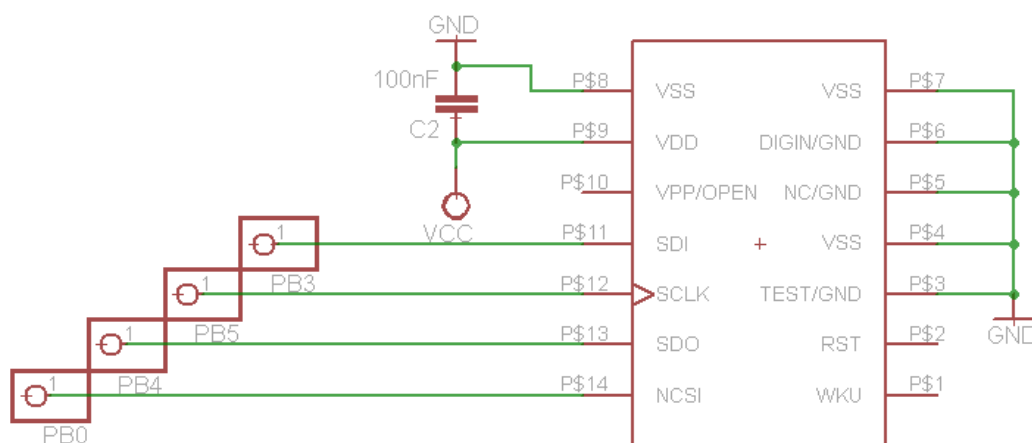
První byl vybrán senzor MS5803-05BA, který měl, i přes absenci měření zrychlení a stavu baterie, menší chybu a větší rozlišení. Cena senzoru se pohybovala v řádu několika tisíc a dlouhé byly i dodací lhůty. Proto byl po dohodě s vedoucím práce vybrán SP100-7A. Třetím senzorem, jehož parametry odpovídaly, byl MPXH6300A. Senzor nebyl vybrán, protože vyžadoval napájení 5V a velká byla i proudová spotřeba 6mA. Zároveň chybělo měření teploty, přestože

senzor má tepelnou kompenzaci. Detailní parametry senzorů jsou uvedeny v tabulce Tab. 4.1.

Tab. 4.1 Sensory tlaku a teploty

Parametry	MS5803-05BA	SP100-7A	MPXH6300A
Rozsah měření tlaku	0-500 kPa, absolutní	0-700 kPa, absolutní	20-304 kPa, absolutní
Chyba měření tlaku	±1,5 kPa	±11 kPa	±1,5% V_{FSS}
Rozsah měření teploty	-40 °C – 85 °C	-40 °C – 125 °C	Není
Chyba měření teploty	±2,5 °C	±2,4 °C	Není
Komunikace	I ² C a SPI	SPI	Analog
Tepelná kompenzace	Ano	Ano	Ano
Rozměry	6,2 × 6,4 × 2,88 mm	11,09 × 6,05 × 3,9 mm	10,6 × 7,62 × 4,44 mm
Napětí a spotřeba proudu při měření	3,3 V; 1,4 mA	3,3 V; 3,5 mA	5,1 V; 6 mA
Cena	Cca 3000 Kč	Cca 320 Kč	Cca 100 Kč

Vybraný senzor vyhovuje stanoveným maximálním hodnotám chyb měření tlaku a teploty, poskytuje i měření zrychlení v ose Z a měření napětí baterie. Nevýhodou byla výrobcem udávaná chyba měření tlaku ±11 kPa (±0,11 Bar). Zapojení tohoto integrovaného obvodu k mikroprocesoru ATMEGA je naznačeno ve schématu



Obr. 4.1 Zapojení senzoru SP100-7A

Senzor komunikuje pomocí sběrnice SPI, jejíž detailní popis je v sekci 3.1. a používá osmibitovou variantu komunikace. Po odeslání prvních osmi bitů zprávy, master musí odeslat dalších 8 hodinových pulzů bez paralelních dat. Během těchto pulzů senzor odpoví na dotaz master zařízení. Odeslaná data musí být ve

formátu LSB first. Důležité je dodržet nulovou polaritu hodin (CPOL0). Čtení a zápis dat probíhá na sestupnou hodinovou hranu (CPHA1). Detailní popis senzoru včetně příkazů a časování sběrnice je k dispozici v oficiální dokumentaci [10].

K budoucímu experimentálnímu měření a ke správnému naprogramování jednotky, bude nutné znát minimální periodu vzorkování k proměření všech dostupných veličin. Tu spočteme z jednoduchého vzorce

$$t_{celk} = t_{tlak} + t_{teplota} + t_{zrychlení} + t_{baterie} = 6 \cdot 10^{-3} + 1,5 \cdot 10^{-3} + 6 \cdot 10^{-3} + 17 \cdot 10^{-3} \quad (3)$$

$$\approx 31 \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

,kde $t_{veličina}$ je udávaná doba měření veličiny. V rovnici není zahrnuta rychlost komunikace a práce procesoru mezi měřeními.

4.2.3 Mikroprocesor ATMEGA328P

Komunikace a zpracování dat v senzoru bude řízeno procesorem ATMEGA328P od společnosti Atmel. V malém pouzdře (ATMEGA328P-AU) je obsažena řada programovatelných, vstupně výstupních portů a SPI sběrnice, sloužící k prvotnímu naprogramování mikrokontroléru. Procesor ve svém pouzdře obsahuje interní RC oscilátor, který je možné využít. Použitím interního oscilátoru dojde ke snížení frekvence procesoru na 8MHz (pro aplikaci plně postačující hodnota) a k minimalizaci počtu externích součástek potřebných pro jeho chod.

Procesor bude naprogramován pomocí vývojové sady Arduino, která po úpravě a správném připojení funguje jako programátor i pro externí procesory. K nahrání programu je nutné připojit procesor k Arduino pomocí pinů TX, RX a RESET. Ke správnému nastavení vnitřních registrů byl použit konfigurační archiv z oficiálních stránek Arduino [11].

ATMEGA328p podporuje obsluhu externího přerušení na pinu PD2 a PD1 a přerušení typu watch-dog, které je generováno v pravidelných, nastavitelných intervalech. Přerušení budou použita k probuzení procesoru z nejspornějšího módu uspání, které se aktivuje vždy po uplynutí nastavené doby a po ukončení měření.

4.2.4 Bezdrátový modul CC2500

Bezdrátovou, obousměrnou komunikaci bude zajišťovat modul CC2500 od společnosti Texas Instruments. Součástka komunikuje po sběrnici SPI, pracuje ve volně použitelném pásmu 2,4GHz, má nastavitelný způsob modulace signálu a nastavitelný kanál. Je-li použita dipólová anténa, dokáže CC2500 operovat s minimem externích pasivních součástek. Dipólová anténa zabírá velkou plochu,

proto bylo použito zapojení s větším množstvím součástek, dovolující použití menší antény. Zmenšení plochy, zastavěné pasivními součástkami, je možno docílit použitím sériově vyráběného modulu od firmy Reyax [12], který potřebné komponenty obsahuje v pouzdře menším, než je možné ručně osadit. Modul používá doporučenou anténu s minimální velikostí při zachování dobré kvality příjmu.

Modul má dva vstupně výstupní piny. Pin GDO0 se nastaví do vysoké logické úrovně v případě příjmu zprávy, jejíž CRC kontrola je v pořádku. Do logické nuly se sepne po vymazání zásobníku na příchozí a odchozí zprávy (RX a TX FIFO) anebo v případě přetečení zásobníku. Výstup GDO0 je připojen k pinu PD2 procesoru Atmel podporující externí přerušování.

Tab. 4.2 Nastavené parametry modulu CC2500

Šířka kanálu	199.951172	Rychlost dat	2.39897 kBaud
Nosná frekvence	2432.99 MHz	Odchylka frekvence	38.0859 MHz
Formát modulace	2-FSK	Základní frekvence	2432.99 MHz
Typický vyzařovací výkon	0 dBm	Spotřeba proudu při vysílání	21.2mA
CRC kontrola a výpočet	Ano CRC-16	Délka preambule	32bitů
Bělení dat	Ne	Délka synchronizačního slova	32bitů
Přidaný status byte	Ano	Délka packetu	Proměnná
Kontrola adresy	Ano	Číslo kanálu	0

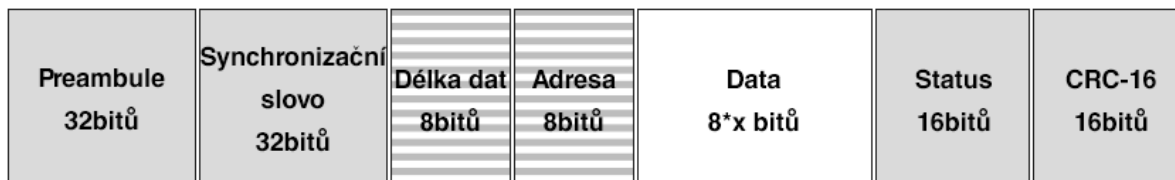
Bezdrátový modul komunikuje 16ti bitovou variantou sběrnice SPI. Při odesílání požadavku procesor zapíše příkaz o délce jednoho bytu, MSB first. První dva bity určují čtení nebo zápis do registru (read/write bit) a bude-li se jednat o dávkovou komunikaci (tzv. burst-mode). Následuje 8 bitů obsahujících samotná data (v případě zápisu). Souběžně se zápisem příkazu je modulem vyslán status byte, nesoucí informaci o aktuálním stavu. Podrobné informace o průběhu komunikace a časování jsou k dispozici v dokumentaci firmy Texas Instruments [13].

Pro správné nastavení registrů modulu, je od společnosti Texas Instruments doporučeno použít externí software (SmartRF Studio 7), který je k dispozici na webových stránkách společnosti. Pro účely testování bylo použito doporučené nastavení s nejpomalejší rychlostí přenosu informace.

Výsledkem nastavení registrů podle

Tab. 4.2 bude tvar odesílaného rámce, který je znázorněn v Obr. 4.2. Stejný tvar rámce bude použit ve všech pneumatikách i v centrální jednotce. Obrázek byl převzat z oficiálního datasheetu a byly do něj přidány některé údaje.

CRC kontrola dat je počítána z celého rámce vyjma synchronizačního slova a preamble.



- Automaticky vloženo při odesílání
- Přidáno uživatelem navíc k datům
- Samotná data

Obr. 4.2 Tvar odesílaného a přijímaného packetu

Ze znalosti velikosti odesílaného rámce a rychlosti přenosu, můžeme spočítat teoretickou dosažitelnou frekvenci odesílání dat pro konkrétní nastavení a to ze vzorce

$$f = \frac{1}{t_{\text{odesílání}}} = \frac{v}{n} = \frac{2398,97}{112 + 8 \cdot x} \approx 14,28 \text{ Hz} \approx 70 \cdot 10^{-3} \text{ s} \quad (4)$$

, kde $t_{\text{odesílání}}$ je doba, potřebná k odeslání dat, v je rychlost přenosu znaků a n je počet bitů v celém rámci. Pro výpočet byla použita hodnota $x = 7$ určující délku dat. Sedm bytů má zpráva, používaná v softwaru v experimentální části. Ve vzorci nejsou započítány faktory, jako je doba výpočtu CRC a podobně.

4.2.5 Napájení

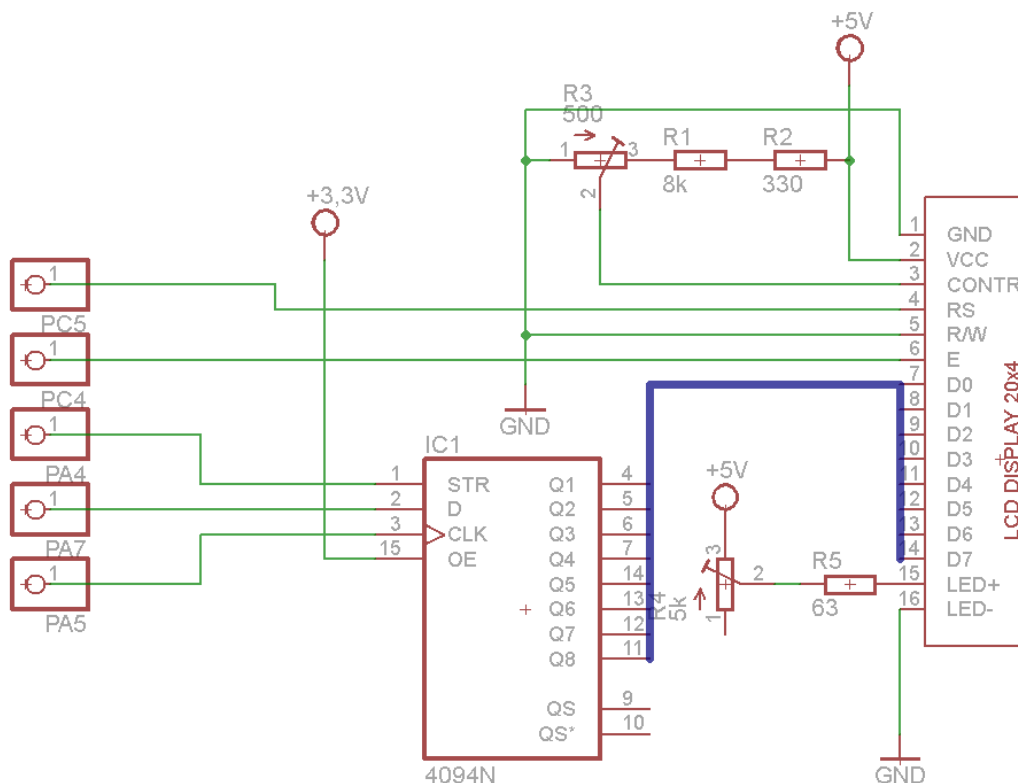
K napájení obvodu byla použita plochá, tzv. knoflíková baterie o průměru 24mm. Baterie bude umístěna v držáku v SMD provedení. Držák je na obrázku Obr. 4.3. Senzor v pneumatice bude mít malou spotřebu, přesto byla zvolena baterie s kapacitou 560mA. Napětí baterie je 3V, což je dostatečné pro správnou funkci obvodu. Modul bude schopen vysílat a přijímat i v případě poklesu napětí na přibližně 2,1V. Zakoupená baterie je konstruována na stálý maximální odběr 5mA a podle dokumentace je schopna po krátký časový interval poskytnout proud až 20mA.



Obr. 4.3 SMD držák baterie [14]

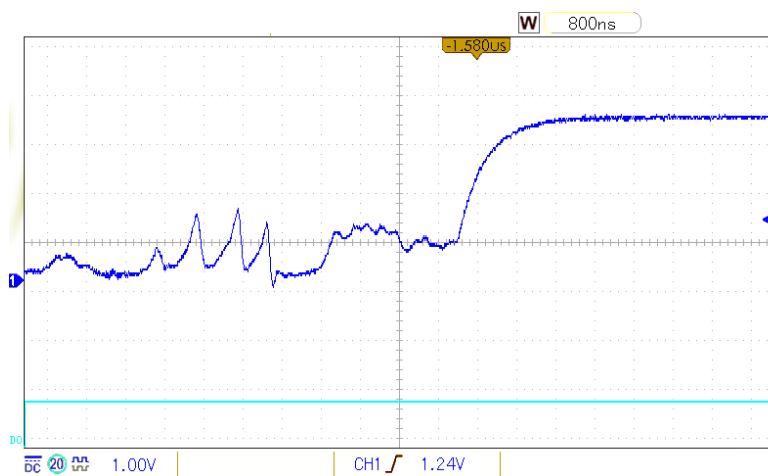
4.2.6 Displej MC2004B/SBL/H

Komunikace mikroprocesoru s displejem v základním zapojení probíhá pomocí jedenácti pinů. Z důvodu šetření dostupných vstupně-výstupních pinů vývojové sady STM32vdiscovery a usnadnění komunikace, nebudou všechny piny připojeny přímo k procesoru. Osm paralelních vstupů, sloužících k zápisu dat, bude připojeno na výstup 8-bitového univerzálního sběrnicevého registru (CMOS 4094). Do registru budou data sériově posílána SPI sběrnici a registr je po potvrzení zapíše na paralelní výstupy Q1 až Q8. K registru bude připojen hodinový vstup SCLK, MOSI a signál STROBE. Do paměti displeje bude pouze zapisováno, proto R/W pin bude připojen trvale k zemi Celkový počet 11 potřebných pinů byl redukován na šest.



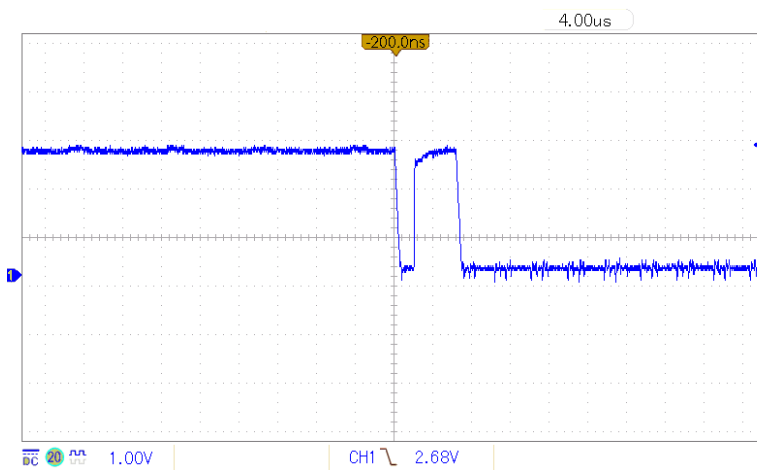
Obr. 4.4 Schéma zapojení displeje

Displej je napájen 5V výstupem z USB, jeho logika je také pětivoltová. Přestože dokumentace [15] k displeji neuvádí minimální hodnotu napětí vysoké úrovně, empiricky bylo zjištěno, že displej 3.3V napětí rozlišuje bez chyb a není nutno použít převodník napětíových úrovní. Kontrast znaků na displeji je nastaven přivedením napětí na 3. pin displeje. Dokumentace neuvádí doporučené minimální ani maximální hodnoty napětí na tomto pinu. Nejlepší čitelnost byla při napětí přibližně 0,45V. Tohoto napětí bude docíleno použitím dvou odporů (R1 a R2) a trimru (R3), kterým se dá kontrast doladit. Podsvícení displeje je regulováno potenciometrem R4.



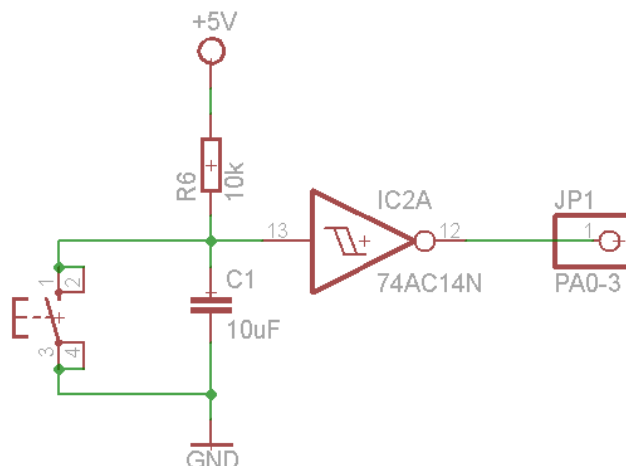
Obr. 4.5 Příklad zánějí na tlačítku

K ovládání displeje byla použita čtyři tlačítka, připojená na vstupy procesoru. Stav tlačítek je odečítán pomocí externích přerušení procesoru. Po stisku tlačítka docházelo ke vzniku zánějí (Obr. 4.5). Záněje způsobovaly spuštění řady přerušení v řadě a chaotické chování při listování a nastavování menu. Proto je bylo nutno řešit softwarově, nebo hardwarově. Bylo použito hardwarové ošetření zánějí.



Obr. 4.6 Záněje s Schmittovým klopným obvodem

Připojení Schmittova klopného obvodu na výstup spínače zamezí vzniku neurčitých úrovní. Schmittův obvod se přepne, je-li následující hrana opačná než předcházející a je-li zároveň úroveň napětí mimo neurčité pásmo. Jak je vidět z obrázku Obr. 4.6, došlo k vyhlazení signálu, přesto stále docházelo k tvorbě záznějí. Ty byly odstraněny paralelním připojením kondenzátoru (například 10uF) ke spínači, (viz Obr. 4.7).



Obr. 4.7 Schéma zapojení jednoho spínače

4.2.7 SD karta

Karta SD je napájena 3,3V výstupem vývojové desky a s procesorem bude komunikovat pomocí SPI. Slot na kartu podporuje zapojení tlačítka pro detekci přítomnosti karty. Tento spínač je připojen na vstup procesoru PC12.

4.3 Výsledné moduly a uchycení v pneumatice

Při návrhu plošného spoje byla nejdůležitějším parametrem velikost výsledné desky. Deska je rozdělena na dvě části: levá část pro baterii a pravá část pro senzor, mikroprocesor, bezdrátovou jednotku a podpůrné součástky. Bezdrátový modul byl umístěn, kvůli jeho velikosti, na spodní stranu plošného spoje. Nad místem, kde je anténa modulu, nesmí být zemnicí plochy, protože tato plocha by stínila anténu a zhoršovala tak příjem.

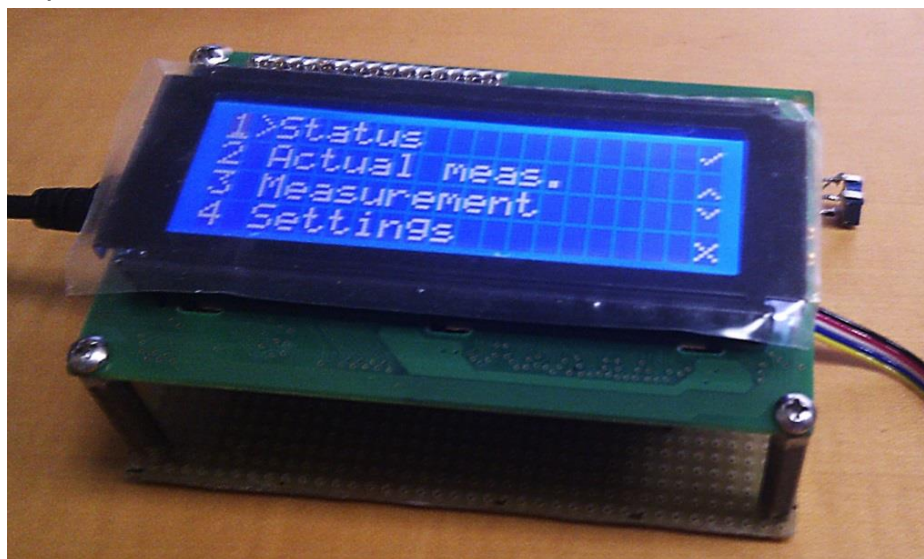
Výsledné elektrické schéma, výkres tištěného spoje a osazení součástkami se nachází v Příloha 5 a Příloha 6.



Obr. 4.8 Plošný spoj se senzorem a anténou na spodní části

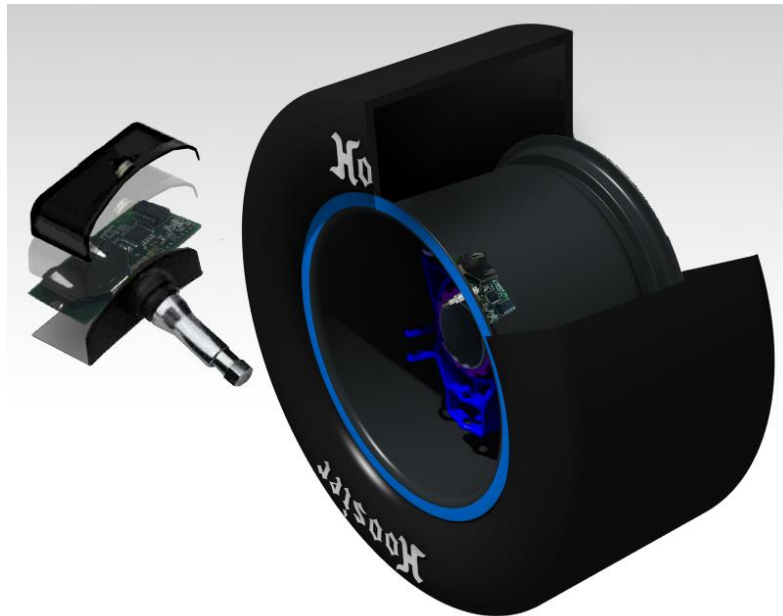
Jak bylo zmíněno v části o vývojovém kitu STM32, bude tento procesor umístěn v kokpitu vozidla spolu s displejem a dalšími ovládacími prvky. Výsledný prototyp centrální jednotky by proto měl být kompaktní a mít minimální rozměry.

Největší komponentou celého návrhu byl displej s řadičem. Pod tímto displejem byla umístěna samotná vývojová sada. Protože STM32vdiscovery neobsahuje ze spodní strany žádnou překážející součástku, vešly se pod procesor všechny ostatní podpůrné obvody. Výjimku tvořil slot na kartu SD, který byl umístěn na spodní stranu univerzálního pájivého pole. Z pole byly vyvedeny vodiče s tlačítky a potenciometr pro nastavení jasu podsvícení. Schéma centrálního modulu je k dispozici v příloze Příloha 7



Obr. 4.9 Výsledný prototyp centrálního modulu

Protože se jedná o prototyp, po konzultaci s týmovými kolegy bylo rozhodnuto, že uchycení senzoru uvnitř kola bude dočasně řešeno přilepením plošného spoje dovnitř pneumatiky na ráfek. Budoucí výsledný produkt bude uchycen jiným způsobem. Ideální se ukazuje uchycení podobně, jako je tomu u komerčních produktů a to uchycením senzoru na ventil pneumatiky. Pro tento způsob uchycení bude nutné správně modifikovat tvar ventilu přivařením malé destičky, na kterou by byl senzor uchycen.



Obr. 4.10 Vize uchycení senzoru

5

Software

5.1 Inicializace STM32vdiscovery

Software centrálního modulu byl napsán v jazyce C. Pro inicializaci i pozdější ovládání částí procesoru byla použita knihovna Standard Peripheral Library. Tyto knihovny zjednodušují počáteční nastavení registrů a inicializaci periférií. Nejprve bylo nutné inicializovat reset and clock control driver (dále jen RCC) a zavést tento hodinový signál do všech používaných periférií. Tyto periférie jsou:

- GPIO – vstupně výstupní piny
- EXTI – externí přerušení
- NVIC – priorita přerušení

Po inicializaci byly nakonfigurovány příslušné periférie tak, aby jejich nastavení odpovídalo parametrům součástek. Všechny piny STM32 používané v aplikaci, budou mít připojeny interní pull-up a pull-down odpory.

Pro ovládání displeje budou použita čtyři tlačítka, která svým sepnutím vyvolají externí přerušení procesoru. Přerušení způsobuje zastavení vykonávání aktuální instrukce, nahraje a vykoná funkci, která je přiřazena přerušení a po jejím ukončení bude pokračovat v předchozí činnosti. Procesor STM32 externí přerušení podporuje jednotlivě pouze pro piny 0-4. V mikroprocesoru jsou implementována i skupinová přerušení, která pod sebou sdružují několik pinů (5-9 apod.). Tyto ale nebyly využity. Přerušení bylo nakonfigurováno tak, aby reagovalo na vzestupnou hranu vstupního signálu.

Parametry komunikace SPI byly nastaveny tak, aby vyhovovaly SD kartě i bezdrátovému modulu. Parametry SPI obou zařízení se ve většině shodují. Rozdíl tvoří využití 8bitového módu komunikace s externí pamětí, zatímco bezdrátový modul využívá komunikaci 16bitovou. Vysílání dat bude probíhat v módu 0 (viz tab 3.1), nejvýznamnější bit jako první (MSB first). Procesor podporuje hardwarové řízení signálu SS. Z důvodu přímé kontroly ovládání bylo použito ovládání softwarové.

Po ukončení konfigurace procesoru bude inicializován přidružený hardware. Pro inicializaci displeje postačuje zapsat sekvenci dat, která je uvedena v dokumentaci použitého displeje [15]. Následuje inicializace modulu CC2500. V defaultním nastavení od výrobce modul komunikuje, ale nedokáže rádiově vysílat ani přijímat

data. Parametry vysílání, nastavené inicializací, jsou uvedeny v sekci 4.2.4, ostatní registry jsou nastaveny na defaultní hodnotu. Výjimku tvoří registr 0x02, který spravuje výstupní pin integrovaného obvodu. Nastavením hodnoty 0x07 do tohoto registru zajistíme nastavení pinu na logickou1 v případě, že modul přijme zprávu, jejíž CRC je v pořádku. Druhou výjimkou je registr 0x18, který specifikuje chování modulu po přijetí či odeslání zprávy. Nastavením zajistíme přechod do módu poslechu

5.2 Zápis na kartu SD

Pro komunikaci mezi aplikační a vstupně-výstupní vrstvou, která je přímo nadřazena kartě, je použit FatFS File System Module [16]. Tento modul je určen pro malé, vestavné systémy a je napsán v jazyce C.

K inicializaci vstupně výstupní vrstvy byl použit volně dostupný příklad [17]. Kód obsahuje funkce a inicializační parametry pro jiný, novější typ procesoru STM32F4xx, který se od námi použitého liší jen v jiných knihovnách Standard Peripheral Library. Komunikace s SD kartou probíhá následovně. Po přivedení napájení 3,3V je na vstupní, hodinový pin SCLK karty přivedeno 74 (a více) hodinových pulzů, sloužících k probuzení karty. Po těchto pulzech je odeslán příkaz nastavující kartu do stavu IDLE, ve kterém čeká na další příkaz. Následuje skupina příkazů rozpoznávající typ karty. Po rozpoznání SD karty dojde k jejímu správnému nastavení pomocí příkazů příslušejících danému typu karty. Kompletní diagram komunikace, stejně jako seznam příkazů, je k dispozici na oficiálních stránkách SD association [18] stejně jako na webové stránce autora námi použité knihovny [16].

5.3 Displej a komunikace s uživatelem

Před zobrazením naměřených dat byla implementována kontrola funkčnosti zařízení. O tuto kontrolu se stará první položka v menu – Status. Po potvrzení položky dojde k odeslání požadavku všem sensorům. Každá použitá aktivní součástka poskytuje o svém stavu nějakou informaci. Nejdůležitější zobrazitelnou informací je informace o stavu senzoru. Původní stav senzoru je zobrazen nápisem OK v případě, že senzor nehlásí žádné chyby. Zobrazí-li se na displeji závažná chyba senzoru, je zobrazena ve formátu dekadického čísla. Po převodu chybového čísla na binární je odhalitelná chyba. Seznam chyb je uveden v tabulce Tab. 5.1 anebo v datasheetu senzoru [10]. Pokud senzor do tří sekund neodpoví, na displeji je zobrazena zkratka „NR“ – „Not Responding“. Tento popis chyby je použit i v dalších obrazovkách.

Tab. 5.1 Význam jednotlivých bitů chybového hlášení

Číslo bitu	Popis chyby
Bit 0:	Přetečení převodníku
Bit 1:	Chyba parity
Bit 2:	Chyba v kontrolním součtu
Bit 3:	Interní reset
Bit 4:	Nespecifikovaná chyba měření z důvodu nízkého napětí
Bit 5:	Chyba senzoru tlaku či zrychlení v důsledku mechanického poškození
Bit 6:	Směr kladného zrychlení
Bit 7:	Probíhá měření

Druhá položka v menu slouží k jednorázovému změření veličin v pneumatice. Po vybrání položky si uživatel může vybrat, které veličiny chce měřit. Měření probíhá ve všech pneumatikách. Po potvrzení nastavení tlačítkem dojde k jednorázovému změření vybraných veličin, které lze zopakovat opětovným stiskem tlačítka.

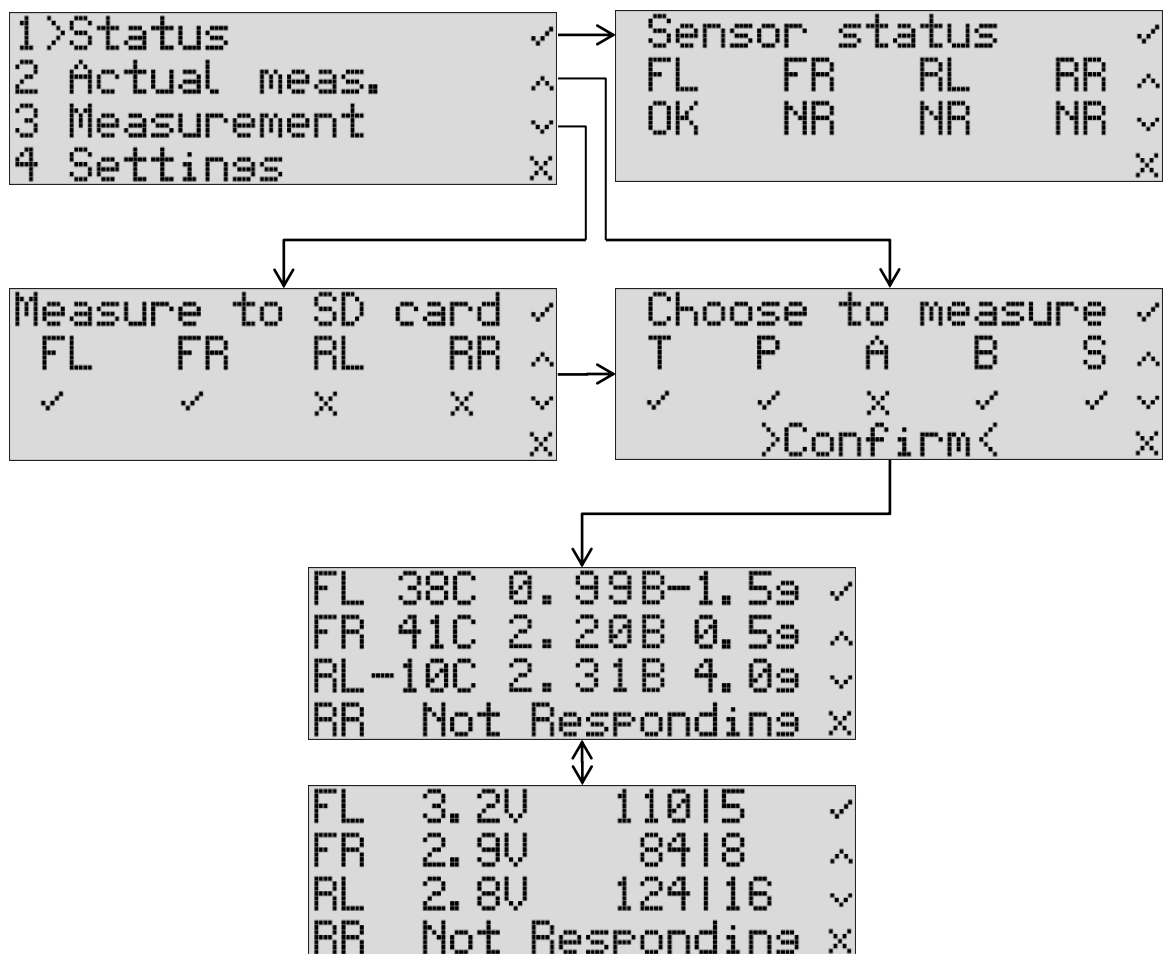
V poslední položce menu je nabídka určená pro měření stavu za jízdy. Uživatel si může vybrat, jaké senzory chce při měření využívat, jaké veličiny zaznamenávat a zda chce ukládat data na kartu SD. Na rozdíl od druhé položky v menu jsou data ze senzoru odčítána pravidelně až do ukončení stiskem tlačítka.

Jak je vidět na obrázku obr. 5.1, v menu jsou navíc další položky, které mohou být jednoduše odebrány či přidány v kódu.

Naměřená data v závěrečných obrazovkách jsou seřazena takto:

- Teplota [°C]
- Tlak [Bar]
- Zrychlení [g]
- Napětí na baterii [V]
- Kvalita příjmu antény na senzoru | centrální antény

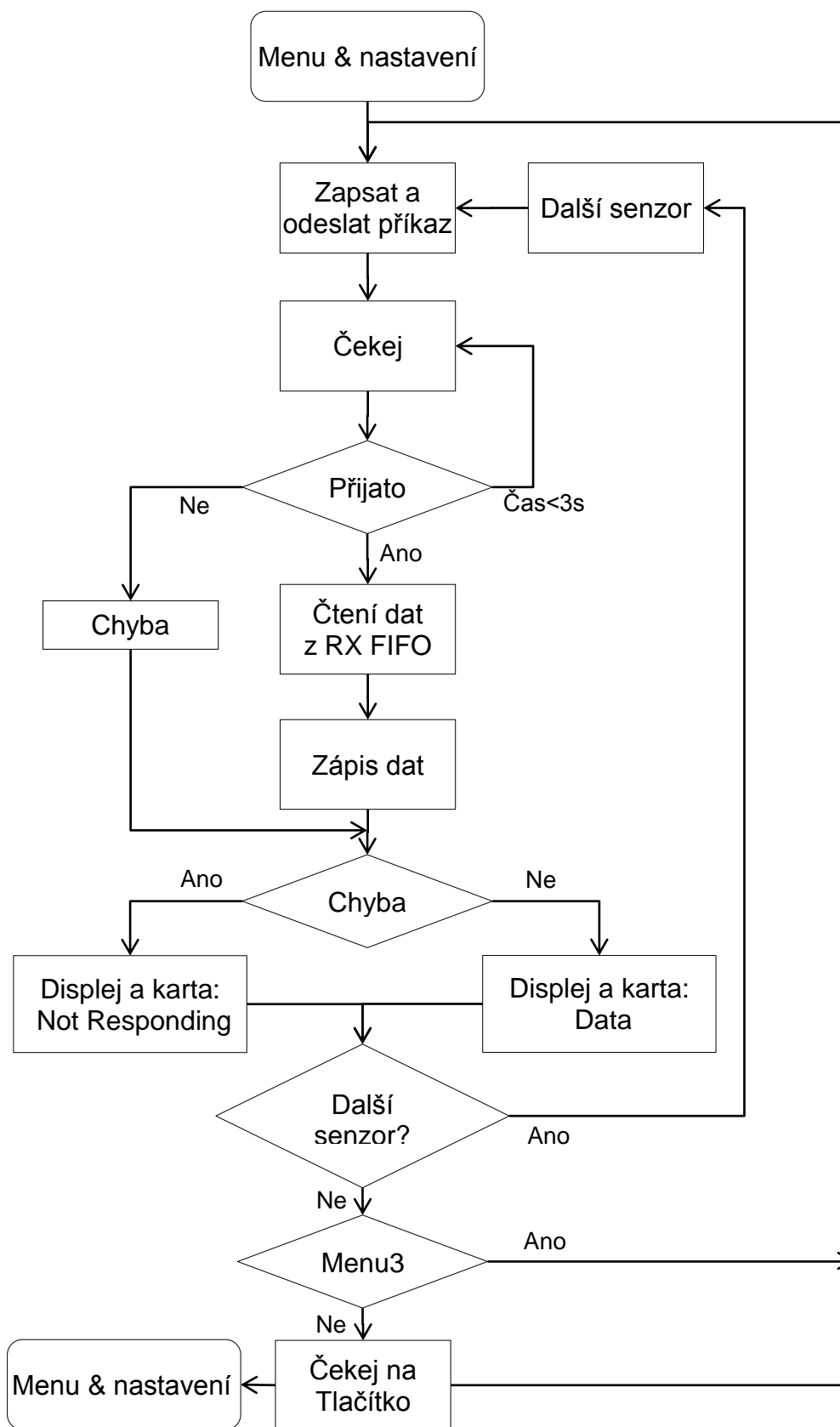
Kvalita příjmu antény je vypočítána ze synchronizačních bitů odesílaného rámce. Kvalitu signálu je vypočítávána modulem CC2500 a automaticky přidávána na konec zprávy. Čím nižší je hodnota, tím je signál kvalitnější.



Obr. 5.1 Diagram grafického uživatelského rozhraní

5.4 Průběh komunikace centrálního modulu

Pro komunikaci mezi zařízeními byl použit model Master-Slave. Detailní diagram komunikace je uveden v Obr. 5.2. Zjednodušeně komunikace probíhá následovně: master (centrální modul) zapíše data do vnitřního zásobníku svého bezdrátového modulu a potvrdí odeslání. Data obsahují, kromě povinného bytu „délka dat“, také adresu cílového zařízení a příkaz, upřesňující, jaké veličiny mají být změřeny.

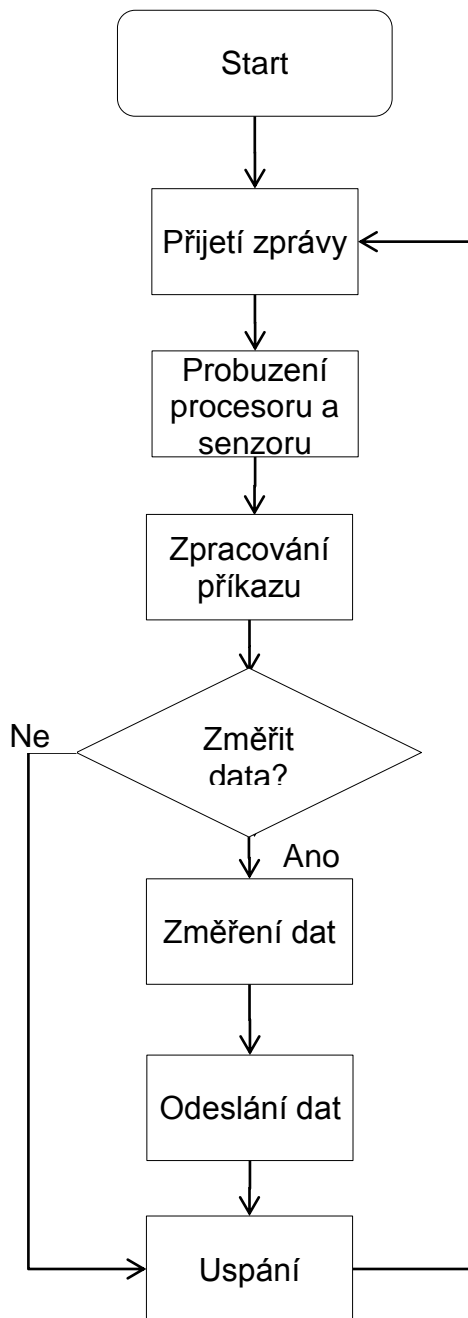


Obr. 5.2 Průběh komunikace centrálního modulu

Poté je anténa přepnuta do módu poslechu a čeká 3 vteřiny na příjem dat. Data jsou standardně přijata během několika milisekund. Po úspěšném přijetí zprávy (s CRC kontrolou), jsou data vypsána na displej a pokračuje se příkazem na další senzor. V případě nepřijetí dat, nebo jsou-li přijata, ale CRC kontrola neodpovídá, jsou data zahozena, a na displej je vypsána chybová zpráva „Not Responding“ u příslušného senzoru. Grafický výstup je naznačen v obrázku Obr. 5.1.

5.5 Modul v pneumatice vozu

Plošný spoj se senzorem byl postaven na procesoru Atmel ATmega328p. Počáteční nastavení vnitřních registrů a propojek bylo provedeno nahráním malého programu, tzv. bootladeru. Bootlader zároveň umožňuje závěrečné programování jen pomocí tří vodičů. Konfigurace vnitřních registrů antény bude stejná, jako v případě antény centrálního modulu. Průběh komunikace a zpracování dotazu je naznačeno v diagramu Obr. 5.3. Anténa je na počátku nastavena v módu poslechu a čeká na přijetí dat. Senzor i samotný procesor je v režimu nízké spotřeby. Spotřeba proudu je snížena o 2mA. V okamžiku přijetí zprávy, s CRC kontrolou v pořádku, nastaví transceiver externí pin GPO0 na logickou 1. Vzestupná hrana signálu způsobí externí přerušeni procesoru a jeho probuzení. Procesor přijme z modulu přijímače data a zjistí, jaké veličiny mají být změřeny. Veličiny jsou změřeny, nahrány do zásobníku odchozích dat (TX FIFO) a transceiverem odeslány. Po odeslání je procesor i senzor uspán a čeká na další probuzení. Anténa je přepnuta do módu poslechu. Po odeslání dat musí být, před další prací s bezdrátovým modulem, zajištěna minimální čekací doba (viz rovnice na straně 17), než jsou odeslána všechna data ze zásobníku, jinak by mohlo dojít k porušení konzistence dat. S tímto programem a nastavením registrů anténního modulu jsme schopni dosáhnout teoretické frekvence měření kolem 6,6 Hz. Odhadovaná frekvence měření se liší v závislosti na době probouzení procesoru a senzoru a na rychlosti sběrnice. Nastavení, použité v tomto projektu, bylo prozatím nastaveno na nejnižší možnou rychlost komunikace. Po nastavení modulu na nejvyšší možnou rychlost přenosu dat, tj. 500kbaud, doba potřebná pro odvysílání dat by byla snížena ze 70ms na zhruba odhadovaných 500 μ s. Takováto rychlost měření by způsobila velký odběr proudu z baterie a následný častý výpadek měřených dat.

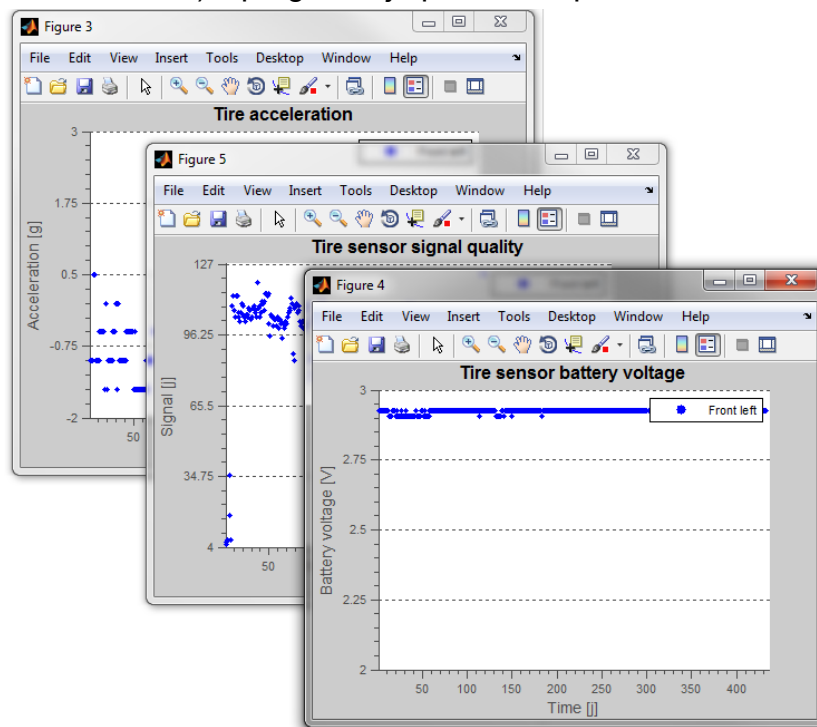


Obr. 5.3 Diagram průběhu zpracování příkazu

5.6 Zobrazení dat

Ke statickému měření dat slouží displej, namontovaný v přední části centrálního modulu. K dynamickému offline měření slouží ukládání naměřených dat na kartu SD. Data jsou ukládána do souboru SDmeas.txt. Soubor obsahuje na prvním řádku hlavičku specifikující, které senzory měřily a jaké veličiny byly měřeny. Ke

čtení datového souboru byl použit software MATLAB 2012b. Naměřená data jsou rozdělena do matic a vykreslena do pěti grafů. Každý graf obsahuje jednu veličinu, vykreslenou k porovnání s daty ze všech senzorů. Poupravený výstup (přidána data z experimentální části) z programu je použit v experimentální části této práce.



Obr. 5.4 Vykreslení naměřených hodnot programem Matlab

6

Experiment

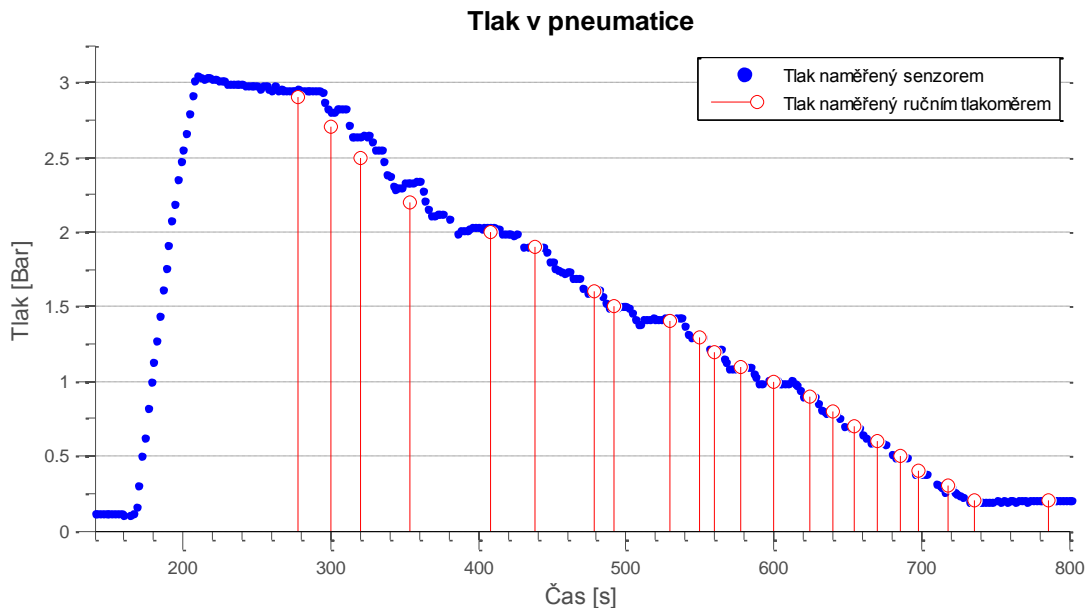
Minimální požadovaný dosah modulu v pneumatice byl alespoň 2,5m. Po experimentu byl potvrzen dosah signálu tři metry a více. Dosah bezdrátového modulu by mohl být zvýšen použitím větší antény v centrálním modulu.

Otestování správnosti měření tlaku bylo provedeno umístěním senzoru do gumového pouzdra a dočasně přichycen dovnitř na ráfek pneumatiky. Po nazutí byla pneumatika převezena do týmové dílny, ve které byl proveden experiment, prověřující chybu senzoru tlaku.



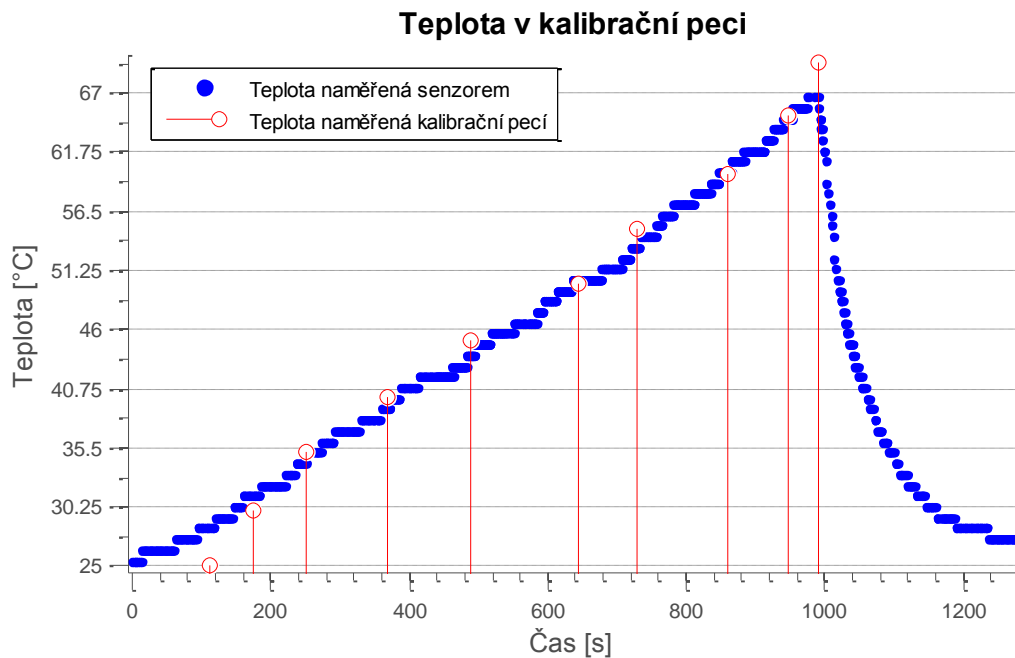
Obr. 6.1 Experiment měření tlaku

Pneumatika byla nafouknuta maximální povolenou hodnotu 300 kPa. Poté byl na ventil kola připojen jeden ze dvou tlakoměrů běžně používaný týmem pro odečítání hodnot tlaku pneumatiky. První manometr měl sice dostatečný měřicí rozsah, jeho nevýhodou bylo rozlišení pouze 20 kPa. Z pneumatiky byl postupně upouštěn vzduch a hodnota tlaku byla pravidelně odečítána na tlakoměru. Po dosažení hodnoty 2 barů (200 kPa), která se běžně při jízdách používá, byl tlakoměr vyměněn za druhý, měřicí s rozlišením 10 kPa. Pokus byl opakován až do vypuštění pneumatiky. Všechny naměřené hodnoty tlaku byly vyneseny do grafu Obr. 6.2 (detailní graf je v příloze Příloha 3) k vzájemnému porovnání. Hodnoty naměřené senzorem v pneumatice byly získány z karty SD. Z grafu plyne, že námi navržený senzor věrně kopíruje hodnotu tlaku čtenou z ručního měřicího přístroje. Větší odchylka je patrná na počátku měření. Důvodem může být horší rozlišení prvního tlakoměru. V případě, že se jedná o chybu senzoru, je tato chyba zanedbatelná, protože pneumatika se nad tlak dvou barů neprovozuje.



Obr. 6.2 Porovnání naměřených hodnot tlaku s referenčním přístrojem

Chyba měření senzoru teploty byla otestována v kalibrační peci, sloužící pro kalibraci senzorů teploty. Kalibrační pec Isotech Venus, která byla zapůjčena Ústavem přístrojové a řídicí techniky, má vestavěné tepelné čidlo s udávanou chybou měření $0,15^{\circ}\text{C}$. Senzor byl umístěn do prostoru kalibrační pece. V průběhu měření byla zvyšována teplota a odečítána teplota měřená senzorem. Výsledek měření je v grafu Obr. 6.3.



Obr. 6.3 Graf měření teploty v kalibrační peci

Z grafu je patrná odchylka teploty měřené senzorem oproti teplotě udávané kalibrační pecí.

V závěru měření proběhl pokus pro změření odezvy na skokovou změnu teploty. Z grafu i z průběhu měření je patrná velká tepelná kapacita pouzdra integrovaného obvodu. Z grafu byla změřena časová konstanta průběhu 138s. Senzor teploty tedy nebude možno použít pro detekci rychlých změn teploty. Graf Obr. 6.3 je k dispozici zvětšený v příloze Příloha 4.

7

Závěr

Cílem této práce byl návrh bezdrátového modulu měřící teplotu a tlak, který bude mít dostatečně malé rozměry, aby byl integrovatelný do prostoru pneumatiky. Práci předcházeli průzkum komerčních zařízení, jejichž parametry, způsob uchycení a způsob komunikace byly použity jako inspirace pro návrh naší měřící aparatury. Po výběru součástek byl proveden návrh plošného spoje a na tuto desku byly úspěšně osazeny všechny komponenty. Součástky byly osazeny i na pájivé pole, nesoucí displej a centrální jednotku. Výsledný prototyp zařízení fungoval podle předpokladů.

Po dokončení experimentální části byly porovnány naměřené parametry našeho návrhu s udávanými parametry komerčních zařízení. Chyba měření tlaku i teploty se ukázala být dostatečně malá a naměřené charakteristiky věrně kopírovaly měření referenčními přístroji. Z výsledků experimentální části můžeme usuzovat, že kvalita měření byla srovnatelná se zakoupenými zařízeními.

Hlavní podmínkou pro úspěšný vývoj zařízení byl, kromě požadavku na přesnost měření, požadavek na malou hmotnost a malé rozměry. Hmotnost zařízení v pneumatice je 20 gramů a rozměry 55×25 milimetrů. Většinu plochy i hmotnosti tvoří baterie. Podmínky návrhu byly splněny.

Do budoucna by práce mohla být vylepšena. Bude nutné vymyslet pro modul alternativní zdroj energie, který by měl menší rozměry, hmotnost a ideálně by nepotřeboval pravidelné dobíjení. V neposlední řadě dojde k optimalizaci programu modulu s ohledem na spotřebu proudu. Jak bylo naznačeno v úvodu, druhé možné použití tohoto modulu by mohlo sloužit k měření veličin uvnitř tlumičů a to bez výrazné změny návrhu, protože senzor je schopen měřit velký tlak v tlumičích.

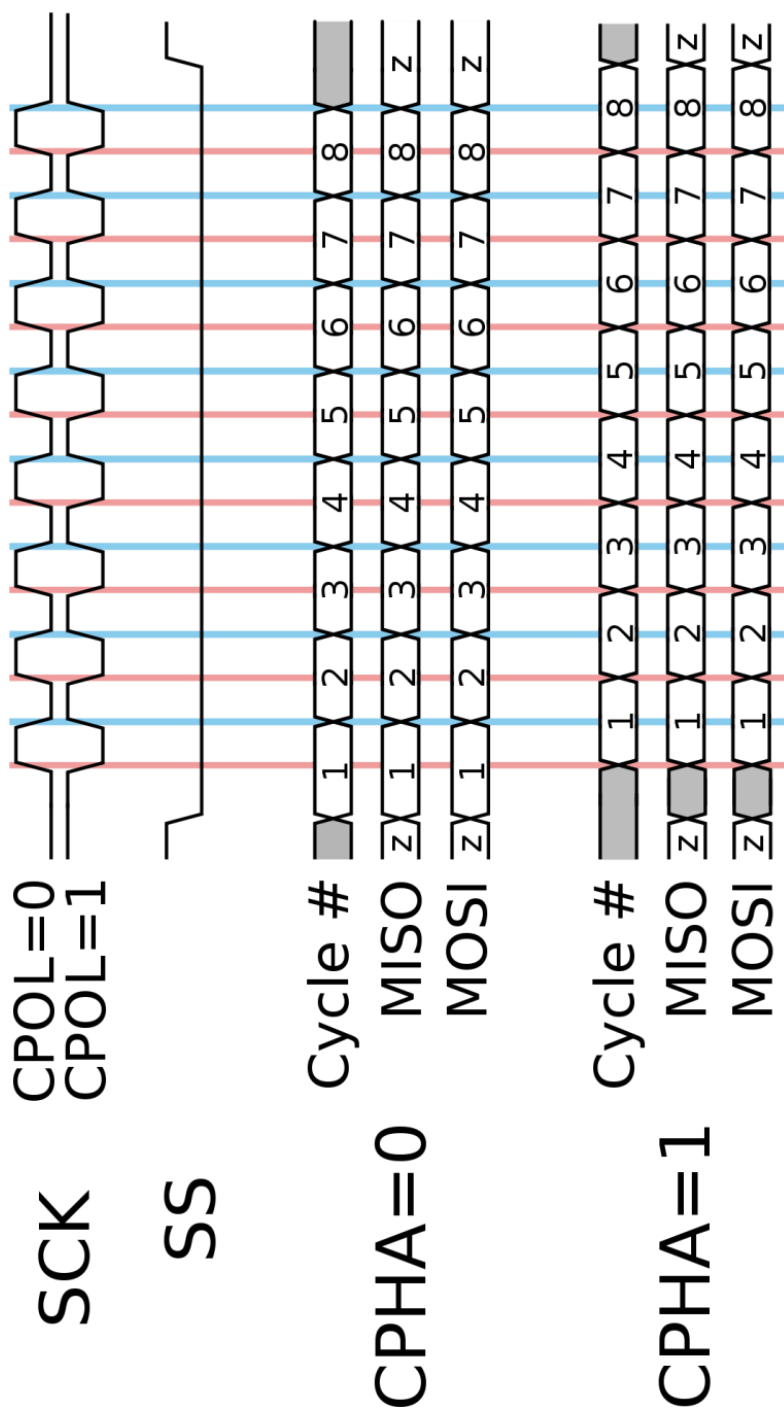
Ukončením této práce pro mne vývoj tohoto zařízení nekončí. Kromě výše zmíněných úprav bude nutné provést některá dlouhodobá měření a odladit zpracování chyb, které mohou při práci zařízení nastat. Plánuji také pokračovat i v dalších projektech týmu CTU CarTech.

Citovaná literatura

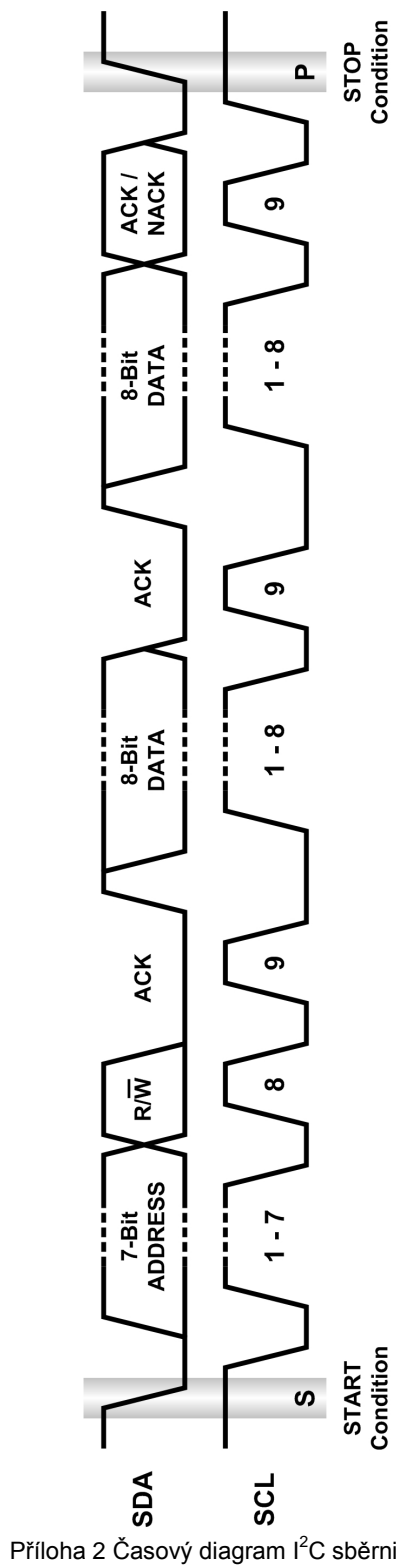
1. **Stack Ltd.** Stack TPMS Pro Datasheet. [Online] Listopad 2012. http://www.stackltd.com/pdf/spec_sheets_2012/tpms_pro_datasheet.pdf.
2. **HawksHead Systems Inc.** HawksHead Tyre Pressure Monitoring System - MotoComp - Online. [Online] [Citace: 4. Duben 2014.] http://motocomp-online.com/index.php?controller=attachment&id_attachment=21.
3. **Freescale Semiconductor.** Freescale Semiconductor | Embedded Processing Solutions. [Online] 4. Únor 2003. [Citace: 2014. Duben 2014.] <http://www.ee.nmt.edu/~teare/ee308l/datasheets/S12SPIV3.pdf>.
4. **NXP Semiconductors.** I2C :: NXP Semiconductors. [Online] 6. Duben 2014. [Citace: 20. Duben 2014.] http://www.nxp.com/documents/user_manual/UM10204.pdf.
5. **Olejár, Martin.** Stručný popis sběrnice I2C a její praktické využití k připojení externí eeprom 24LC256 k mikrokontroléru PIC16F877. [Online] 20. Květen 2000. [Citace: 20. Duben 2014.] <http://www.hw.cz/navrh-obvodu/strucny-popis-sbernice-i2c-a-jeji-prakticke-vyuziti-k-pripojeni-externi-eeeprom-24lc256>.
6. **Veda.** Membrane Rosette Strain Gage - Production | Group of companies VEDA. *Veda*. [Online] 20. Květen 2014. [Citace: 20. Květen 2014.] <http://veda.com.ua/en/catalogue/tenzorezistory/membrana/54.html>.
7. **Föll, H.** Christian-Albrechts-Universität zu Kiel. *What is MEMS?* [Online] [Citace: 13. Květen 2014.] http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/semitech_en/kap_7/backbone/r7_1_1.html.
8. **Olmr, Vít.** Senzory pro měření tlaku v integrovaném provedení. *hw.cz*. [Online] 2014. [Citace: 10. květen 2014.] <http://www.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/senzory-pro-mereni-tlaku-v-integrovanem-provedeni.html>.
9. *www.bakal06.chytrak.cz. Státnice ČVUT FEL 2006 Bc.* [Online] [Citace: 10. Duben 2014.] http://www.bakal06.chytrak.cz/2006_K42.pdf.
10. **Sensoror.** [Online] 3. Červen 2006. [Citace: 12. Prosinec 2013.] [http://www.sensoror.com/media/30318/sp100-7\(t\),%20sp100-7a\(t\),%20sp100-12a%20datasheet.pdf](http://www.sensoror.com/media/30318/sp100-7(t),%20sp100-7a(t),%20sp100-12a%20datasheet.pdf).
11. **team, The Arduino.** <http://arduino.cc/en/Tutorial/ArduinoToBreadboard>. [Online] 2014. [Cited: Duben 20, 2014.] <http://arduino.cc/en/uploads/Tutorial/Breadboard.zip>.
12. **REYAX TECHNOLOGY CO.,LTD.** RF. [Online] [Citace: 11. Duben 2014.] http://www.reyax.com/Module/RF/CC2500M_V10.pdf.
13. **Texas Instruments.** Wireless Connectivity - Proprietary 2.4 GHz - CC2500 - TI.com. [Online] 19. Květen 2009. [Citace: 18. Říjen 2013.] <http://www.ti.com/product/cc2500U>.
14. **Digi-Key Corporation.** BK-883-TR MPD (Memory Protection Devices) | BK-883CT-ND | DigiKey. *Digi-Key*. [Online] 2014. [Citace: 17. Květen 2014.] <http://www.digikey.com/product-detail/en/BK-883-TR/BK-883CT-ND/755450>.
15. **Everbouquet/Wayton.** GM Electronic. [Online] [Citace: 11. Duben 2014.] <http://www.gme.cz/img/cache/doc/513/077/mc2004e-syl-datasheet-1.pdf>.

16. **Chan.** FatFs - Generic FAT File System Module. [Online] Březen 1, 2008. [Cited: Květen 5, 2014.] http://elm-chan.org/fsw/ff/00index_e.html.
17. **Elia.** Reading SD cards with the STM32F4-Discovery|Elia's Electronics Blog. [Online] 26. Únor 2014. [Citace: 6. Květen 2014.] <http://eliaselectronics.com/reading-sd-cards-with-the-stm32f4-discovery/>.
18. **SD Association.** Home - SD Association. [Online] 2014. [Citace: 6. Květen 2014.] <https://www.sdcard.org/>.
19. **Cburnett.** File:SPI timing diagram.svg - Wikimedia Commons. [Online] 19. Prosinec 2006. [Citace: 14. Duben 2014.] http://commons.wikimedia.org/wiki/File:SPI_timing_diagram.svg.
20. **Kugelstadt, Thomas.** Planet Analog - Articles - SIGNAL CHAIN BASICS (Part 32): Digital interfaces (con't) -- The I2C Bus. [Online] 8. Červen 2009. [Citace: 21. Duben 2014.] <http://i.cmpnet.com/planetanalog/2009/08/C0442-Figure2.gif>.
21. **Auto-Moto.** Měřicí přístroj tlak/teplota pneu : Auto-Moto Riegger s.r.o. [Online] 12. Listopad 2013. <http://www.riegger.cz/obchod/zbozi/merici-pristroj-tlak-teplota-pneu/118799/>.
22. **Freescale Semiconductor.** Xtrinsic MPXx85/86xxD Tire Pressure. [Online] 5. Květen 2013. [Citace: 23. Prosinec 2013.] <http://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Freescale%20Semi/MPXx85,86xxD.pdf>.
23. **MT4.** HawksHead Tyre Pressure Monitoring System-MotoComp-Online. [Online] [Citace: 10. Listopad 2013.] <http://motocomp-online.com/tyre-pressure-monitoring-system/474-hawkshead-tyre-pressure-monitoring-system.html>.

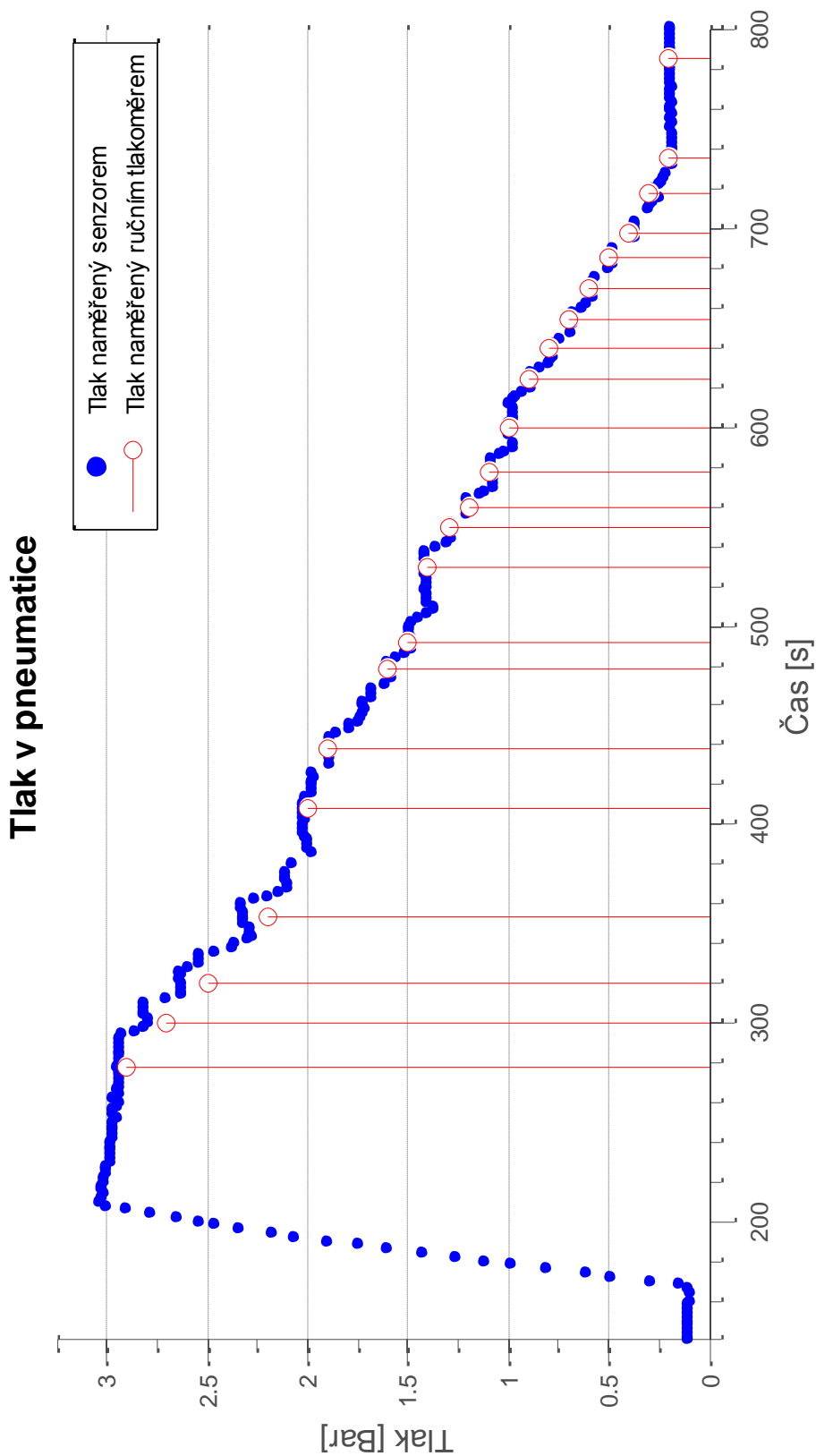
Přílohy



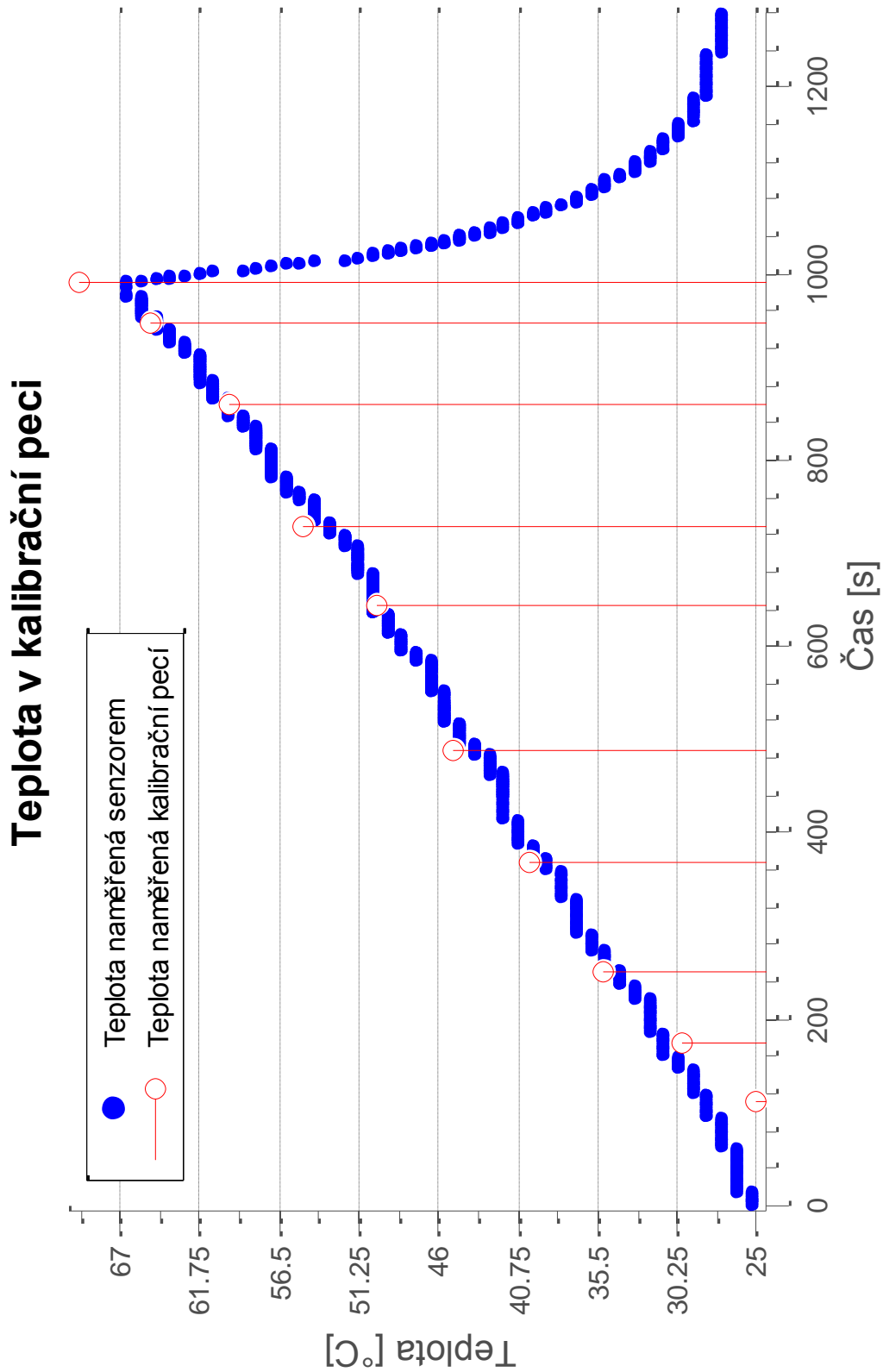
Příloha 1 Časový diagram SPI sběrnice [19]



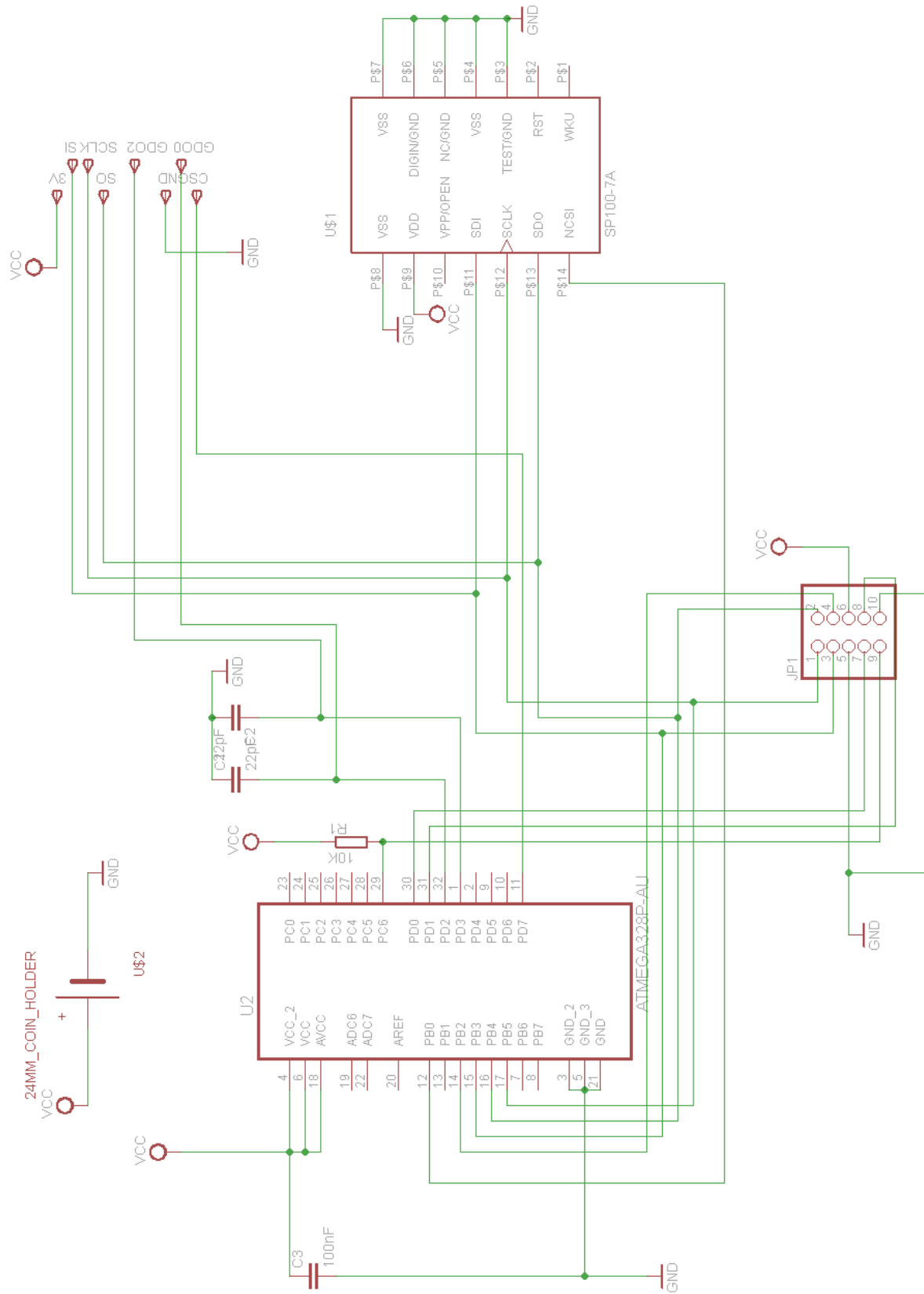
Příloha 2 Časový diagram I²C sběrnice [20]



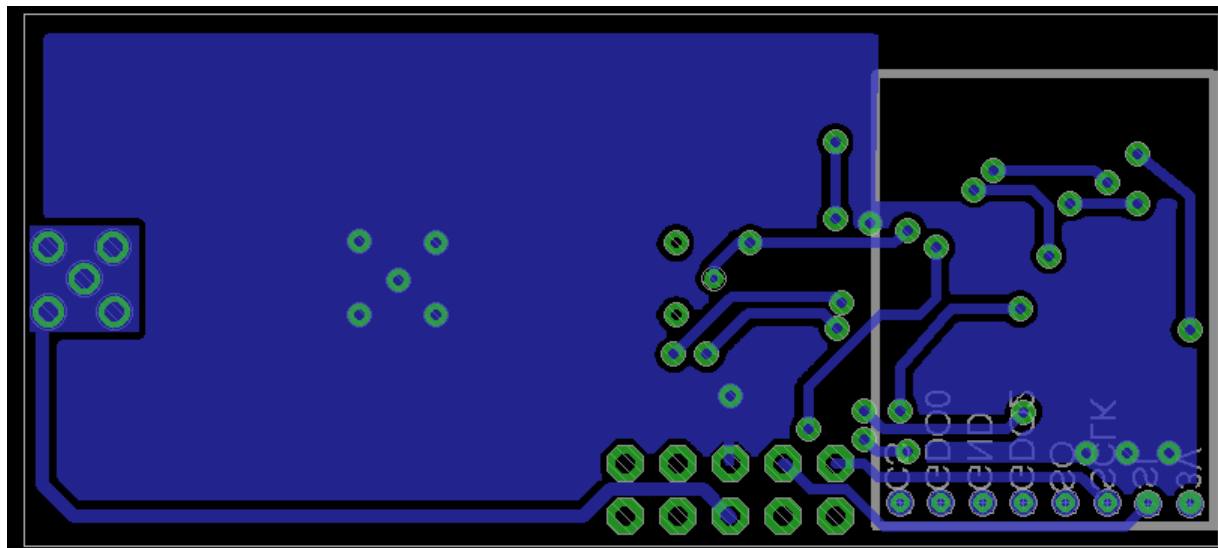
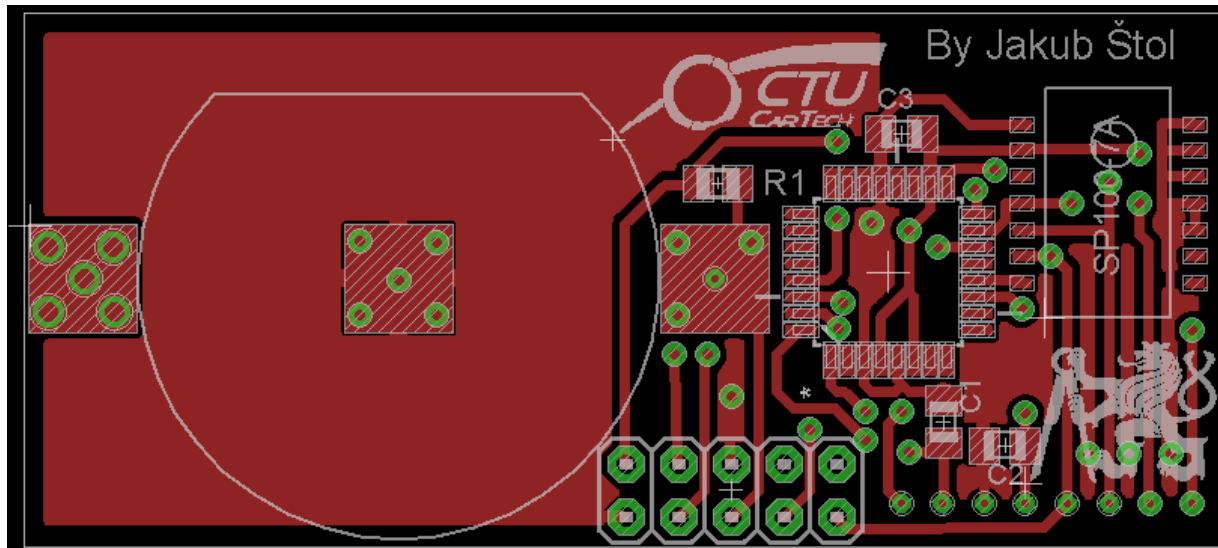
Příloha 3 Porovnání naměřených hodnot tlaku s referenčním přístrojem



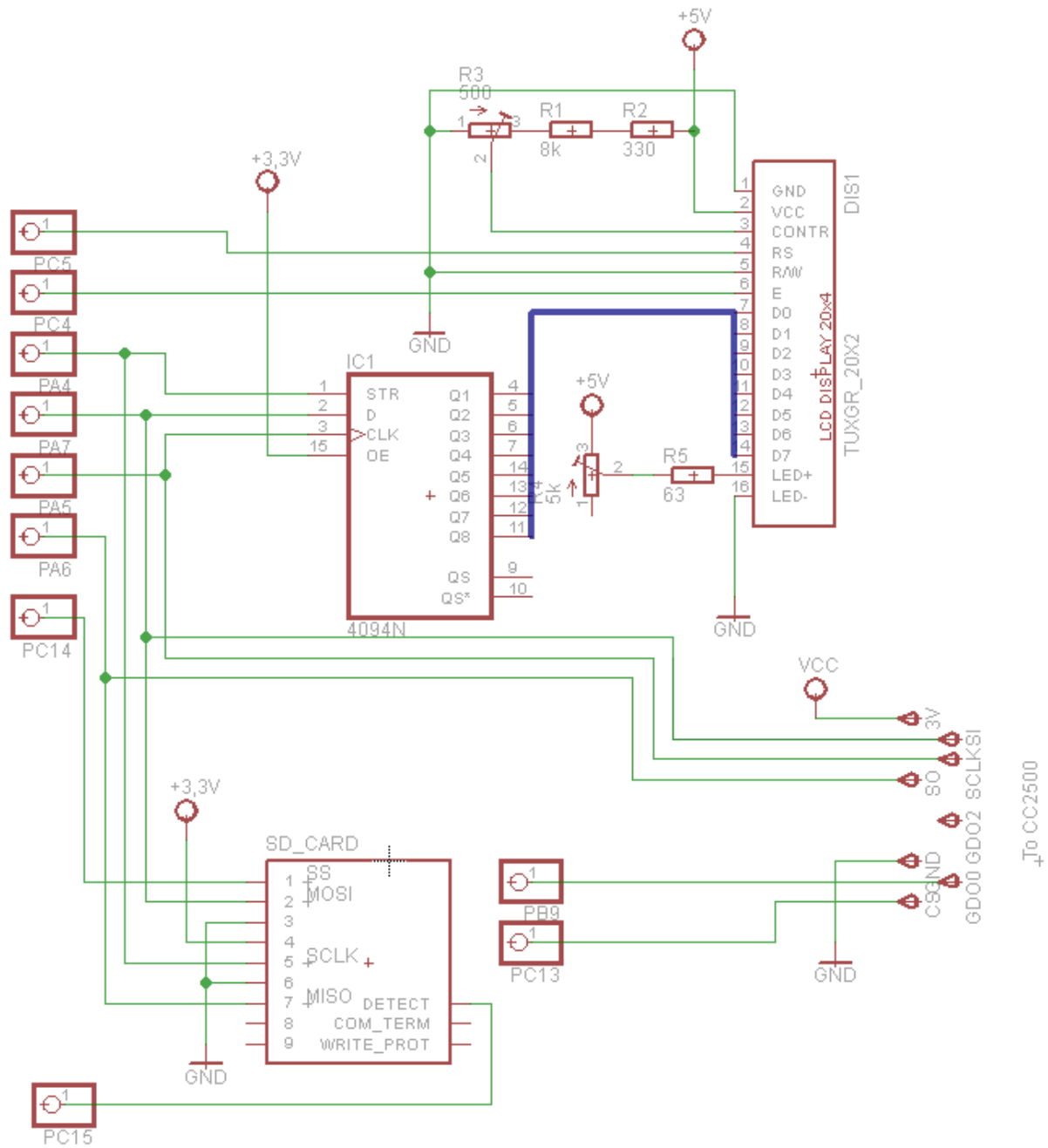
Příloha 4 Graf měření teploty v kalibrační peci



Příloha 5 Konečné schéma modulu



Příloha 6 Schéma plošného spoje horní strana(horní obr) a dolní strana(dolní obr)



Příloha 7 Schéma centrálního modulu

Seznam obrázků

Obr. 2.1 Ilustrační fotografie ST9351 [1]	3
Obr. 2.2 Blokové schéma senzoru	6
Obr. 3.1 Blokové schéma sběrnice SPI.....	7
Obr. 3.2 Blokové schéma sběrnice I ² C	9
Obr. 3.3 Konstrukce membránových senzorů tlaku	10
Obr. 3.4 Fóliová rosetta, membrána [6] a MEMS sensor [7]	11
Obr. 4.1 Zapojení senzoru SP100-7A	14
Obr. 4.2 Tvar odesílaného a přijímaného packetu	17
Obr. 4.3 SMD držák baterie [14]	18
Obr. 4.4 Schéma zapojení displeje	18
Obr. 4.5 Příklad záznějí na tlačítku	19
Obr. 4.6 Zázněje s Schmittovým klopným obvodem	19
Obr. 4.7 Schéma zapojení jednoho spínače	20
Obr. 4.8 Plošný spoj se senzorem a anténou na spodní části	21
Obr. 4.9 Výsledný prototyp centrálního modulu	21
Obr. 4.10 Víze uchycení senzoru	22
Obr. 5.1 Diagram grafického uživatelského rozhraní	26
Obr. 5.2 Průběh komunikace centrálního modulu	27
Obr. 5.3 Diagram průběhu zpracování příkazu	29
Obr. 5.4 Vykreslení naměřených hodnot programem Matlab	30
Obr. 6.1 Experiment měření tlaku	31
Obr. 6.2 Porovnání naměřených hodnot tlaku s referenčním přístrojem	32
Obr. 6.3 Graf měření teploty v kalibrační peci	32

Seznam tabulek

Tab. 2.1 Parametry Stack TPMS	3
Tab. 2.2 Parametry MPXX8XXD	4
Tab. 2.3 Parametry HawksHead Moto Track 4	4
Tab. 3.1 Pojmenování a označení fází datového a hodinového signálu	8
Tab. 4.1 Senzory tlaku a teploty.....	14
Tab. 4.2 Nastavené parametry modulu CC2500.....	16
Tab. 5.1 Význam jednotlivých bitů chybového hlášení.....	25

Obsah CD

K této práci je přiloženo CD, na kterém jsou uloženy následující položky

- Zdrojový kód centrální jednotky
- Zdrojový kód modulu v pneumatice
- Script programu Matlab pro vykreslení naměřených dat
- Dokumentace k použitým součástkám
- Výrobní podklady, elektrotechnická schémata a knihovny součástek
- Tato práce