

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Bezdrátový Měřicí Systém Tlaku a Teploty Pneumatik Automobilu

Bc. Ondřej Šereda

Vedoucí: Ing. Ondřej Nentvich



FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA RADIOELEKTRONIKY

4. ledna 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Šereda** Jméno: **Ondřej** Osobní číslo: **459226**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**
Specializace: **Elektronika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Bezdrátový měřicí systém tlaku a teploty pneumatik automobilu

Název diplomové práce anglicky:

Wireless System for Pressure and Temperature Measurement in a Car

Pokyny pro vypracování:

Provedte rešerši elektroniky pro měření tlaku v pneumatikách a bezkontaktní měření teploty pneumatik. Na základě rešerše navrhnete elektroniku, která bude měřit tlak v pneumatikách do tlaku alespoň 6 barů a teplotu v rozmezí 0 °C až 150 °C s přesností +/- 1 °C u bezkontaktního měření teploty. Naměřená data se budou bezdrátově odesílat pomocí Bluetooth do zařízení pro sběr dat k následnému vyhodnocení naměřených dat. Elektroniku navrhnete tak, aby byla lehká, napájená z knoflíkové baterie a zohlednete během návrhu i možnosti úsporných režimů pro snížení spotřeby elektrické energie na minimum. Realizujte a prakticky ověřte vlastnosti navrženého zařízení, které zhodnotíte v závěru práce. Navrhnete doporučení pro další postup řešení problému.

Seznam doporučené literatury:

- [1] ZÁHLAVA, Vít. Návrh a konstrukce desek plošných spojů: principy a pravidla praktického návrhu. Praha: BEN - technická literatura, 2010. ISBN 978-80-7300-266-4.
- [2] GUIGGIANI, Massimo. The science of vehicle dynamics: handling, braking, and ride of road and race cars. Dordrecht: Springer, 2014. ISBN 9401785325;9789401785327
- [3] RIPKA, Pavel, 2005. Senzory a převodníky. Praha: Vydavatelství ČVUT. ISBN 80-01-03123-3.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Ondřej Nentvich, katedra radioelektroniky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **08.09.2021**

Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce: **19.02.2023**

Ing. Ondřej Nentvich
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Pavel Hazdra, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta



Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou 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,

.....



Poděkování

Chtěl bych poděkovat mému vedoucímu diplomové práce Ing. Ondřejovi Nentvichovi za jeho konstruktivní rady a vstřícnost při vypracování práce.

Dále bych chtěl poděkovat členům týmu eForce za dlouhodobou spolupráci a jmenovitě těmto lidem - Ing. Patrik Bachan, Ing. Marek Lázslo, Vojtěch Michal, Bc. Jakub Sedlář, Ing. Jiří Teichman, Bc. Lukáš Kolbaba a všem ostatním.

Nakonec bych chtěl poděkovat své rodině, která i přes nesnáze mě ve studiu vždy podporovala.



Anotace

Diplomová práce se zaměřuje na návrh a realizace měřící systému teplot a tlaku pneumatik pro elektrickou formuli eForce FSE.X. Systém měří bezkontaktně vnější a vnitřní teplotu pneumatiky v rozsahu 0 - 150 °C a tlak v rozmezí 0,5 bar-2,5 bar . V úvodu práce je popsána obecná funkce použitých senzorů a je provedena úvaha nad daty z testování pneumatik. Součástí práce je zhotovení zařízení a jeho instalace na vozidlo. Na zařízení proběhlo testování pro zjištění nastavení podvozku pro disciplínu skidpad.

Klíčová slova: Bezdrátové měření, Formula Student, IR senzor teploty, Pneumatika, BLE

Abstract

The diploma thesis focuses on the design and implementation of a temperature and pressure measurement system for electric formula eForce FSE.X. The system measures the outer and inner tire temperature contactlessly in the range 0-150 °C and pressure in range 0.5-2.5 bar. The introduction describes the general function of the sensors used and provides a discussion of the tire test data. The actual construction of the device and its installation on the vehicle is also part of the work. The device was tested to determine the suspension settings for the skidpad discipline.

Keywords: Wireless measurement, Formula Student, IR temperature sensor, Tire, BLE



Obsah

Seznam obrázků	III
Seznam tabulek	V
Seznam zkratk	VI
1 Úvod	1
1.1 Motivace	1
1.2 Formula Student	1
1.3 eForce FEE Prague Formula	2
1.4 Koncepce elektrické formule	3
2 Teorie	5
2.1 Měření teploty	5
2.2 Měření tlaku	5
2.3 Měření Vlhkosti	6
2.4 Pneumatika	7
2.4.1 Příčná dynamika	8
2.4.2 Podélná dynamika	10
2.5 Tlak v pneumatice	11
2.6 Sběrnice vozidla	12
2.7 Bezdrátové technologie	12
2.7.1 Bluetooth Low Energy (BLE)	12
2.7.2 Zigbee	13
3 Realizace HW	15
3.1 Senzory	16
3.1.1 IR Senzor	16
3.1.2 Senzor tlaku	18
3.2 Sensorová deska externí	19
3.3 Sensorová deska interní	20
3.4 Hlavní deska	26
3.5 Výsledná realizace	28
4 Realizace FW	32
4.1 Externí měření teploty	32
4.2 Interní měření	36
4.3 Hlavní Deska	41
4.3.1 STM32	41
4.3.2 BL652	44
5 Testování	45
5.1 Testování funkčnosti	45
5.2 Testování	47
5.3 Výsledky testování	48
6 Závěr	53



A Přílohy	57
A.1 Schéma externí desky	57
A.2 Layout externí desky	58
A.3 Schéma interní desky	59
A.4 Layout interní desky	60
A.5 Schéma hlavní desky	61
A.6 Layout hlavní desky	64



Seznam obrázků

1	Dynamická disciplína skidpad převzato z [1].	2
2	Tým eForce s pilotovanou a autonomní formulí na nejprestižnějších závodech v Německu (autor fotografie FSG Schulz).	3
3	Fotografie monopostu FSE.X (autor fotografie FSG Partenfelder).	4
4	Zapojení Wheatsonova můstku (převzato z [4]).	6
5	Saturační tlak páry (data převzata z [5]).	6
6	Souřadnicový systém kola podle ISO 8855.	7
7	Úhel skluzu pneumatiky.	7
8	Úhel odklonu pneumatiky převzato z [6].	8
9	Graf závislosti boční síly na úhlu skluzu.	9
10	Graf závislosti boční síly na úhlu skluzu pro různý tlak.	9
11	Graf závislosti boční síly na úhlu skluzu pro různý odklon.	10
12	Graf závislosti dopředné síly na míře prokluzu převzato z [8].	10
13	Změna tlaku podle rovnice ideálního plynu pro různá RH.	11
14	Frekvenční rozložení kanálů BLE převzato z [10].	13
15	Výkres kolové sestavy.	15
16	Blokové schéma měřicího systému.	16
17	IR senzor teploty Melexis 90640 převzato z [13].	17
18	Graf přesnosti pixelů pro senzory s různými FOV převzato z [13].	17
19	Graf závislosti obnovovací frekvence a šumu převzato z [13].	17
20	Blokové schéma systému měření externí teploty.	19
21	Vizualizace externího senzoru teploty.	20
22	Kapacita baterie CR2032 pro různá zatížení převzato z [18].	22
23	Interní odpor CR2032 u různých výrobců převzato z [19].	22
24	Grafy účinnosti nábojové pumpy.	23
25	Grafy účinnosti boost zdroje.	24
26	Porovnání rozložení součástí na plošném spoji.	25
27	Vizualizace interní desky	26
28	Vizualizace hlavní desky.	28
29	Uchycení senzorů na vozidle.	29
30	Fotografie namontovaného senzoru.	30
31	Fotografie realizace hlavní desky.	31
32	Vývojový diagram vyčítání dat podle výrobce.	32
33	Diagram stavového automatu vyčítání dat.	34
34	Vývojový diagram protokolu RS485 z pohledu senzoru.	36
35	Vývojový diagram kódu BLE periferie.	37
36	Program <i>nRF Connect for Desktop</i> připojen ke všem čtyřem senzorům.	39
37	STM32 Power Consumption Measurement.	39
38	Odběr zařízení při inerci.	40
39	Odběr zařízení při připojení.	41
40	Vývojový diagram protokolu RS485 z pohledu hlavní desky.	42
41	Grafické rozhraní pro zobrazení celého snímku.	45
42	Zobrazení celého snímku namontovaného senzoru.	45
43	Grafické zobrazení proužku teplot.	46
44	Umístění senzorů vůči pneumatice.	46
45	Úhlová korekce externích senzorů.	47
46	Teplota všech kol před korekcí.	48



47	Teplota levých pneumatik při neutrálním odklonu.	49
48	Teplota levých pneumatik při odklonu +4mm.	49
49	Teplota levých pneumatik při odklonu -4 mm.	50
50	Porovnání teplota levých pneumatik při tlaku 0,75 bar.	50
51	Porovnání teplota levých pneumatik při tlaku 0,5 bar.	51
52	Porovnání externí a interní teploty.	51



Seznam tabulek

1	Tabulka možných senzorů teploty.	16
2	Tabulka možných senzorů tlaku.	18
3	Tabulka možných BLE modulů.	21
4	IR měření teploty pro interní senzor.	21
5	Odběr jednotlivých komponent desky.	21
6	Výběr MCU pro hlavní desku.	26
7	Rozložení signálů externích teplot v CAN zprávě.	43
8	Rozložení signálů interních teplot.	44
9	Rozložení signálů tlaků pneumatik.	44



Seznam zkratek

- BLE** Bluetooth low energy
- BOM** Bill of materials (Kusovník)
- DMA** Direct memory access (Přímý přístup do paměti)
- DPS** Deska plošných spojů
- EMI** Elektromagnetická interference
- FOV** Field of view (Zorné pole)
- FPU** Floating point unit (Matematický koprocessor)
- FSAE** Formula SAE
- FSG** Formula student germany
- FW** Firmware
- GFSK** Gausovské klíčování frekvenčním posuvem
- IO** Integrovaný obvod
- MCU** Mikrokontrolér
- MEMS** Mikro-elektro-mechanický systém
- OQPSK** Posunuté kvadrurní klíčování fázovým posunem
- PWM** Pulzně šířková modulace
- RH** Relative humidity (Relativní vlhkost)
- RMS** Efektivní hodnota
- RSSI** Received signal strength indicator (Indikátor síly přijímaného signálu)
- RTOS** Real time operating system
- SAE** Společnost automobilových inženýrů
- SDK** Software development kit
- SMD** Součástky pro povrchovou montáž
- SoC** System on Chip (Systém na čipu)
- STM** ST Microelectronics
- TWI** Two-Wire interface



1 Úvod

Tato práce se zaměřuje na návrh měřicího systému, který měří teplotu a tlak pneumatiky závodního vozidla. Teplota je měřena na více místech uvnitř a zvenku. Kromě návrhu je práce zaměřena i na realizaci celého systému a na jeho ověření v reálných podmínkách.

1.1 Motivace

Jsou to právě pneumatiky, které jsou v přímém kontaktu s vozovkou a mají největší roli v chování vozidla. Podvozek se navrhuje tak, aby dokázal s pneumatikami co nejlépe pracovat. Více možností nastavení podvozku umožňuje najít ideální parametry pro každou disciplínu nebo potřeby řidiče. Větší možnost volby také ztěžuje rozhodování a proto je vhodné kvantifikovat, co znamená ideální nastavení podvozku. Hodnocení pilotů může být často přínosné, ale častěji subjektivní. V této práci se pouze zaměříme na maximalizaci kontaktní plochy s vozovkou. Tření pneumatiky o vozovku způsobí oteplení namáhané plochy styku.

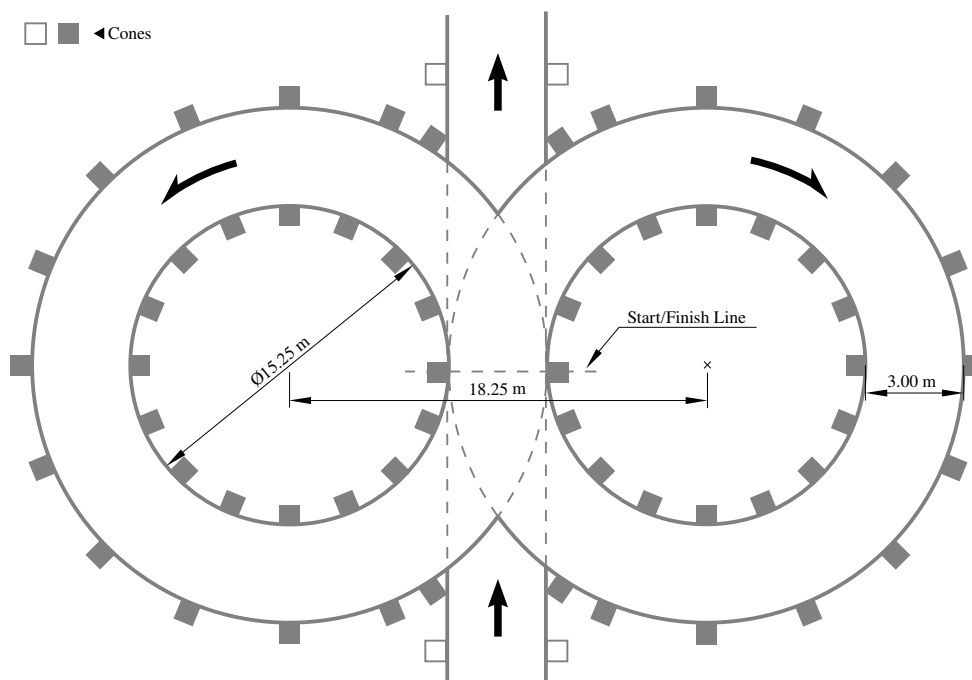
Z teploty pneumatik můžeme zjistit, zda jsou pneumatiky využívány v teplotním okně, pro které jsou navrženy. V případě měření teploty v celé šířce pneumatiky získáme informaci o rozdílech teploty na pneumatice, a tak je možné najít optimální nastavení podvozku vozidla pro maximalizaci kontaktní plochy s vozovkou.

Při kombinaci měření teploty pneumatiky v celé její šířce a měření tlaku dokážeme najít i optimální tlak, kdy nedochází k konkávnímu/konvexnímu prohnutí pneumatiky. V průběhu závodu se teplota celé kolové sestavy mění a tedy dochází nutně i ke změně tlaku. Konstantním monitorováním tlaku dokážeme lépe upravit tlak v pneumatice tak, aby se maximalizovala doba, kdy je tlak v pneumatice ideální.

1.2 Formula Student

Jedná se o soutěž, která byla založena v roce 1980 americkou organizací SAE. Tato soutěž měla za úkol lépe připravit inženýry do praxe pomocí konstrukce reálného vozidla se závodními parametry. Tato soutěž zaznamenala velkou oblibenost ve chvíli, kdy se připojil evropský kontinent. Bylo to zejména založením německých závodů FSG. Němečtí pořadatelé začali vydávat svoje vlastní pravidla, které se na začátku příliš nelišila od těch amerických. Nicméně jsou to právě němečtí organizátoři, kteří přidali kategorii elektrických vozidel a nyní, v poslední době také autonomních.

Závody se skládají ze dvou hlavních disciplín a to statických a dynamických. Statické disciplíny jsou zaměřené na obhajobu inženýrského návrhu. Odborníci z praxe hodnotí přístup a zajímavost použitých řešení a tak není pravidlem, že nejrychlejší vozidlo na trati vyhraje i inženýrský návrh. Z dynamických disciplín se jedná o akceleraci se statickým startem na 75 m, kde se prověří zejména dopředné zrychlení vozidla a pro ověření bočních charakteristik zde máme skidpad Obrázek 1 kde se jedná o trať ve tvaru čísla osm. Tato trať se standardně používá při testování bočních charakteristik vozidel v průmyslu.



Obrázek 1: Dynamická disciplína skidpad převzato z [1].

Pak jsou to disciplíny autokros a endurance. V těchto disciplínách se jede předem známá trať na čas, nicméně ve vytrvalostním závodě se jede na 22 kol (každé kolo má přibližně 1 km). Tato poslední disciplína prověří auto hlavně z pohledu spolehlivosti.

1.3 eForce FEE Prague Formula

Projekt elektrické formule eForce FEE Prague Formula je již tradiční účastník inženýrské série Formula Student, který nedávno oslavil 10 let od vzniku. Vznik týmu se datuje do roku 2010 a v roce 2020 představil tým plně autonomní monopost. Tento projekt je veden fakultou Elektrotechnickou ČVUT v Praze. Na financování projektu se podílí fakulta a také mnoho průmyslových firem, bez jejichž podpory by nebylo možné projekt uskutečnit. Projektu se v aktuální době účastní okolo 60 studentů a aktivně okolo 20, které lze vidět na fotografii (Obrázek 2). Každý rok je tým schopen postavit nový monopost a v poslední době dokonce dva.



Obrázek 2: Tým eForce s pilotovanou a autonomní formulí na nejprestižnějších závodech v Německu (autor fotografie FSG Schulz).

1.4 Koncepte elektrické formule

Formule týmu eForce (Obrázek 3) používá čtyři stejné synchronní motory s permanentními magnety. Každý motor je řízen separátně a jeho maximální výkon je 35 kW a 30 Nm před převodovkou, tak na kolech auto poskytuje až 1560 Nm točivého momentu při váze pouhých 190 kg. Šasi vozidla je kompozitní skořepina sendvičové struktury z uhlíkových vláken s hliníkovou voštinou a pěnovým jádrem ROHACELL s hlavním obloukem z chrommolybdenové vysoko pevnostní oceli a předním obloukem z pevnostního hliníku svařený metodou TIG. Podvozek má nezávislé zavěšení všech kol a dvojitá A-ramena nestejně délky na obou nápravách typu push-rod. Byly použity hydraulické tlumiče od firmy Öhlins a typ TTX 25 FSAE.

Maximální rychlost formule, která v dynamických disciplínách může dosáhnout okolo 125 km h^{-1} a nastává pouze v disciplíně akcelerační. Průměrná rychlost v disciplíně autokros se pohybuje okolo 60 km h^{-1} .



Obrázek 3: Fotografie monopostu FSE.X (autor fotografie FSG Partenfelder).

Vozidlo obsahuje dvě CAN sběrnice, kdy jedna sběrnice má rychlost 1 Mbit s^{-1} a druhá 500 kbit s^{-1} . Sběrnice s nižší rychlostí je určena pro kritické zprávy mezi jednotkami v autě např. pro požadavky od pilota a řízení měniče. Tato sběrnice má nižší rychlost z důvodu vyšší odolnosti vůči rušení, proto její obsazenost je nižší a také kritičtější. Druhý CAN je určen pouze pro senzory, které standardně posílají data s frekvencí 200 Hz. Na této sběrnici jsou zejména zprávy o teplotě a napětí všech článků nebo z inerciálních senzorů. Sběrnice jsou logovány pomocí průmyslového dataloggeru od společnosti Vector. Data lze následně exportovat, a tak je možné s nimi pracovat v programu jako je např. Matlab.



2 Teorie

2.1 Měření teploty

V této práci se budeme zabývat pouze bezdotykovým měřením teploty, protože v této aplikaci jiná možnost nepřípadá v úvahu. Pyrometrie se zabývá měřením povrchové teploty na základě vyzařovaného elektromagnetického vlnění. Podle zákona o záření absolutně černého tělesa každý objekt vyzařuje elektromagnetické vlnění. Spektrální hustota B_ν tohoto vlnění je závislá na teplotě tělesa T . Zákon, který popisuje tento vztah, se nazývá Planckův vyzařovací zákon.

$$B_\nu(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1} \quad (1)$$

Tato rovnice platí pouze pro ideálně černá tělesa. Reálné objekty nevyzařují stejně, a proto se zavádí emisivita ε , která pro absolutně černá tělesa je 1,0. Emisivita tak vyjadřuje účinnost, se kterou materiál vyzařuje energii. Celkový výkon P vyzařený tělesem lze vyjádřit podle Stefan-Boltzmannova zákona jako

$$P = A \varepsilon \sigma T^4 \quad (2)$$

kde A je plocha, σ je Stefan-Boltzmannova konstanta.

Senzory proto můžeme rozdělit na dvě hlavní kategorie a to tepelné a kvantové. Hlavní rozdíl v těchto senzorech je v principu zpracování této energie. Kvantové senzory přeměňují záření přímo na elektrony v křemíku a zpracovává se výsledný proud. Tepelné detektory absorbují energii, která změní teplotu a toto zvýšení se měří změnou odporu senzoru [2].

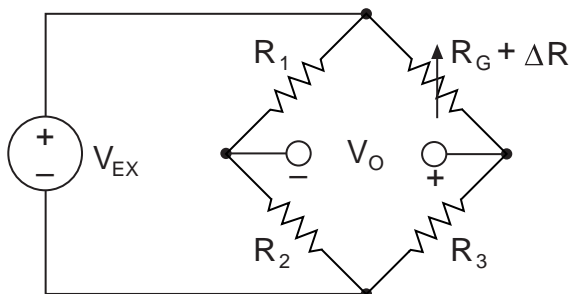
2.2 Měření tlaku

Tlak p lze definovat jako sílu F , která působí kolmo na hraniční plochu S .

$$p = \frac{dF}{dS} \quad (3)$$

Tato úzká vazba mezi silou a tlakem umožňuje měřit místo tlaku sílu působící na známou plochu. Tlak je označován jako absolutní, pokud je jako nula počítáno vakuum. Relativní tlak je vztažen k ambientnímu tlaku[3]. Definice se mohou lišit podle odvětví např. v meteorologii se jedná o tlak korigovaný k nadmořské výšce. Diferenční tlak je v tomto případě rozdíl mezi dvěma body.

Realizací senzoru je velké množství a uvedu zde pouze pár příkladů (další možnosti lze dohledat v [3]). Jedna z realizací je použití kovového tenzometru, který je umístěn na membráně, a změna tlaku je zde měřena změnou odporu. Další realizace je např. polovodičový tenzometr s využitím piezorezistivního efektu, a proto tento typ snímání musí být teplotně kompenzovaný. V aplikacích s vyšší úrovní vibrací může být přidán kompenzační akcelerometr[2]. Obě možnosti umožňují zapojení do Wheatsonova můstku viz. Obrázek 4 a velmi častá je realizace jako MEMS.



Obrázek 4: Zapojení Wheatsonova můstku (převzato z [4]).

Zapojení do můstku lze realizovat s 1,2 nebo 4 tenzometry. Na Obrázek 4 lze vidět zapojení pouze s jedním tenzometrem. Při zapojení dvou tenzometrů, které jsou na sebe kolmé, lze dosáhnout teplotní kompenzace. V zásadě lze tvrdit, že přidáním tenzometrů zvyšujeme citlivost měření a přidáváme teplotní kompenzaci.

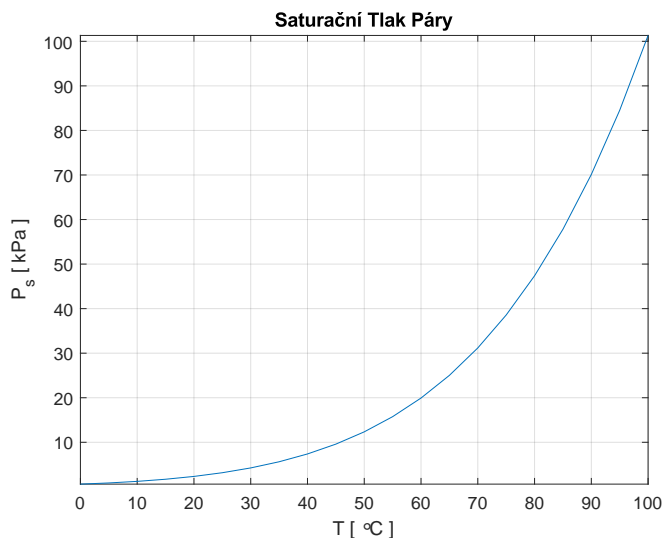
Zajímavá možnost měření může být opticky, kde senzory jsou teplotně stabilní [3] oproti výše zmíněným.

2.3 Měření Vlhkosti

Relativní vlhkost (RH) je poměr aktuálního tlaku páry k maximálnímu saturačnímu tlaku páry při stejné teplotě.

$$RH = 100 \cdot \frac{P_w}{P_s} \quad (4)$$

S teplotou se tlak páry zvyšuje viz. Obrázek 5 a i obsah vody ve vzduchu.



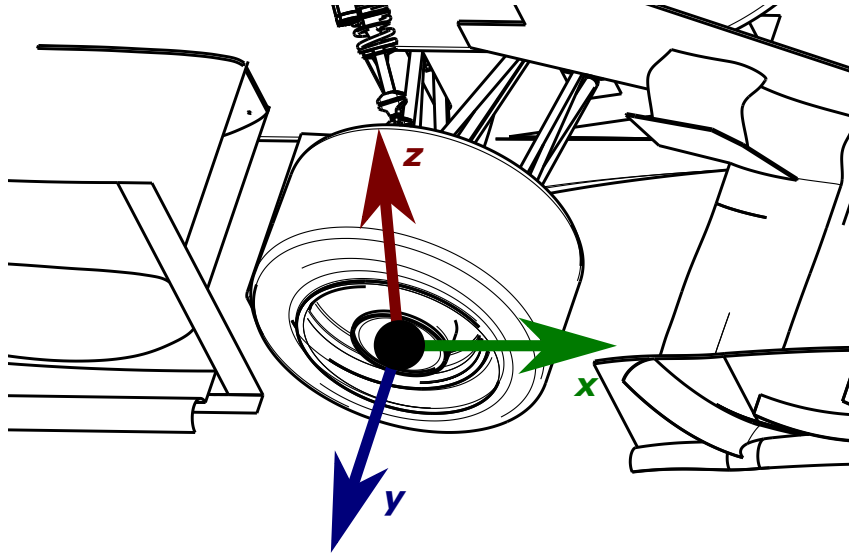
Obrázek 5: Saturační tlak páry (data převzata z [5]).

Senzory můžeme rozdělit na dvě nejpoužívanější kategorie a to jsou odporové a kapacitní. Kapacitní senzor používá tenkou vrstvu materiálu, který je dielektricky závislý na absorbované vlhkosti. Odporový opět používá materiál, který absorbuje vlhkost a odpor je závislý na koncentraci. Měření pak musí probíhat pouze pomocí

střídavé složky, aby nedocházelo k elektrolyze. Proces absorpce je pomalý ale díky miniaturizaci (MEMS) se rychlost velmi zvýšila [3].

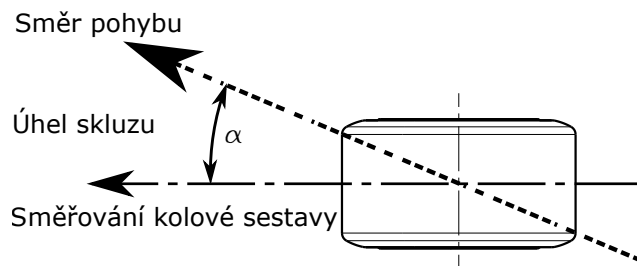
2.4 Pneumatika

Při práci s pneumatikou se zavádí její souřadnicový systém v této práci použijeme definici podle ISO 8855, který je vidět na Obrázek 6.



Obrázek 6: Souřadnicový systém kola podle ISO 8855.

kde F_y je boční síla v ose y , F_z v ose z je síla kterou je kolo tlačeno vůči vozovce, F_x v ose x je dopředná síla a Ω je úhlová rychlost v ose y . Úhel skluzu α pneumatiky je definován jako úhel mezi směřováním vozidla a pneumatiky (Obrázek 7).



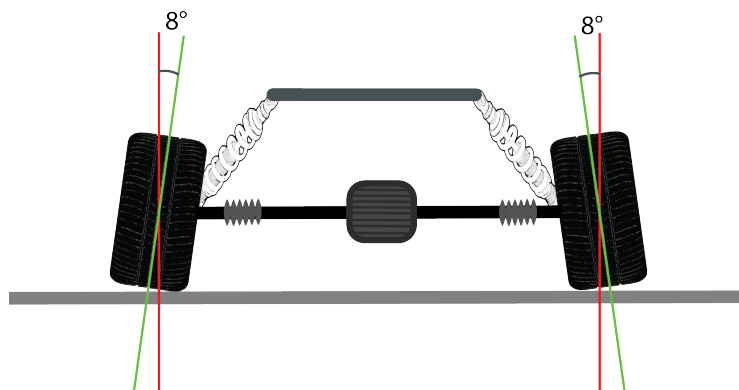
Obrázek 7: Úhel skluzu pneumatiky.

Míra prokluzu není univerzálně definována, ale nejčastěji se používá definici podle ISO 8855 jako

$$SR = \left(\frac{\Omega \cdot R_C}{V} \right) \cdot 100 \quad (5)$$

kde Ω je úhlová rychlost kola, R_C je efektivní rádius pro volně se odvalující pneumatiku a V je rychlost vozidla (nikoliv kola).

Odklonem je označován úhel mezi kolem a kolmicí na vozovku Obrázek 8. Pokud kola směřují jako na Obrázek 8, jedná se o negativní odklon a pro opačný úhel zase o pozitivní.



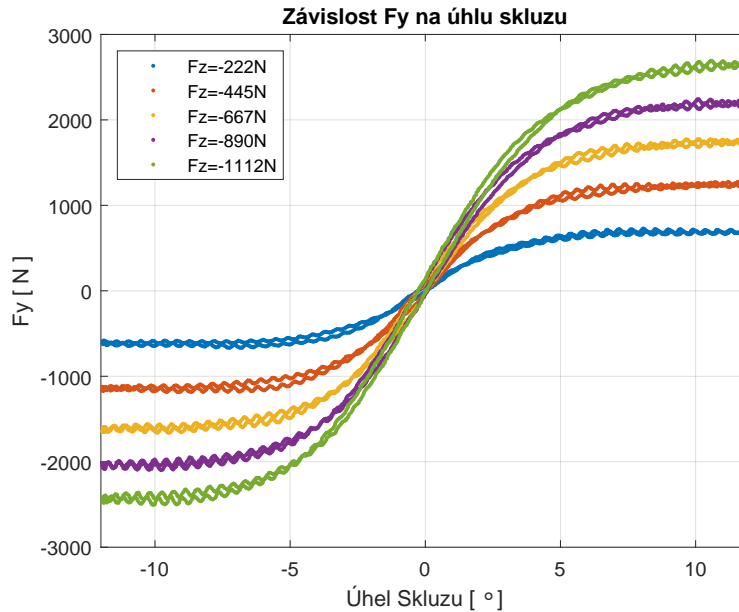
Obrázek 8: Úhel odklonu pneumatiky převzato z [6].

Standardní charakterizace chování pneumatiky je docílena pomocí jejího měření. Sílu, které je produkována pneumatikou lze rozložit do dopředné a boční. Analýzou těchto dat dokážeme určit ideální pracovní okno ve kterém pneumatika přeneše maximální sílu na vozovku. Dat z měření může být velké množství a pro zjednodušení se prokládají křivkou, která má pro pneumatiky definované koeficienty tzv. Magic Formula[7]. Testování nejčastěji probíhá na smirkovém papíře, proto vyprodukovaná síla je násobně vyšší než při použití na vozovce. Data jsou vhodná pro porovnání pneumatiky mezi výrobci a nebo zjištění provozních parametrů.

2.4.1 Příčná dynamika

Data jsou použita se svolením *Formula SAE Tire Test Consortium (FSAE TTC)* a změřena institutem *Calspan Tire Research Facility (TIRF)*. Při testování dochází k variaci těchto parametrů: rychlost vozovky (kola nejsou hnaná), tlak, odklon, F_z , úhel skluzu a změřená síla F_y . Díky těmto datům lze exaktně určit při jakém nastavení předchozích parametrů poskytuje pneumatika maximální boční sílu.

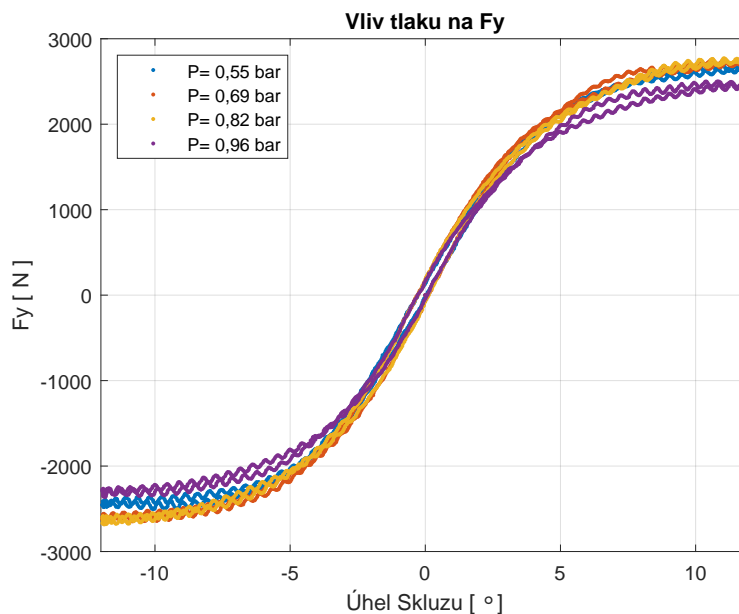
Následující graf ukazuje boční charakteristiku pneumatiky s nastavením odklonu 0° a tlakem 0,55 bar.



Obrázek 9: Graf závislosti boční síly na úhlu skluzu.

Při testování se provede změna úhlu skluzu tam i zpět pro možnost odstranění hystere pneumatiky (proto jsou v grafu vidět dvě křivky).

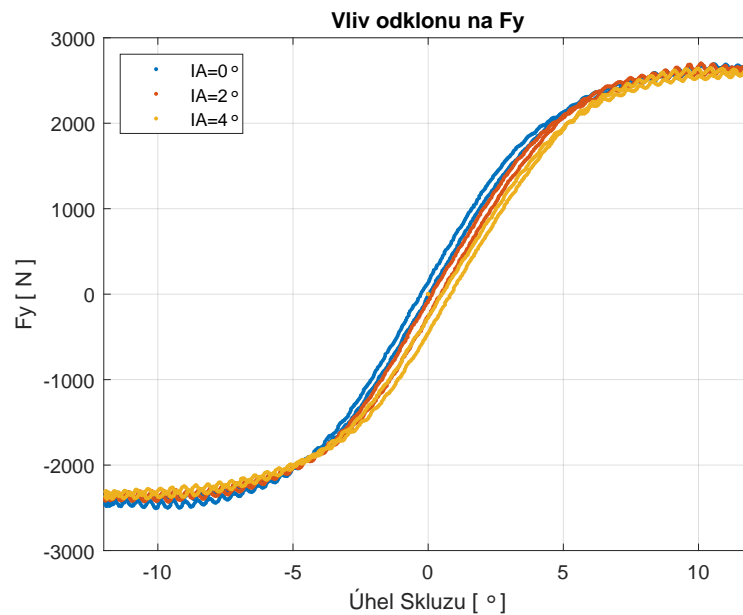
Následující graf Obrázek 10 porovnává rozdílné tlaky pro nulový odklon a $F_z = -1112$ N. Maximální hodnota F_y je při tlaku v rozmezí 0,69-0,82 bar, ve kterém by mělo vozidlo pohybovat v průběhu celého závodu.



Obrázek 10: Graf závislosti boční síly na úhlu skluzu pro různý tlak.

Vliv odklonu zobrazuje následující graf Obrázek 11 při tlaku 0,69 bar a $F_z = -1112$ N. Při odklonu 2° dochází k posunu celé křivky a tak při při úhlu skluzu 0° již dochází

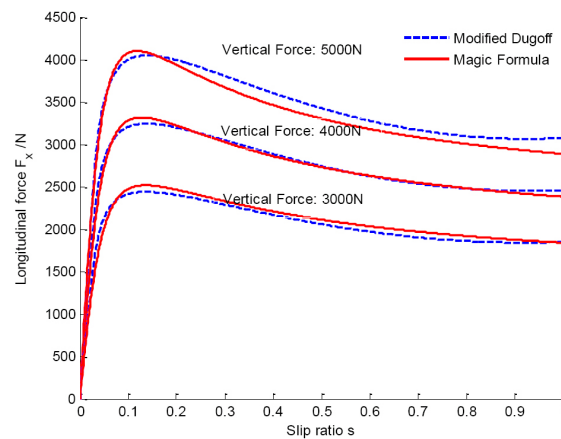
k vytváření boční síly. Z grafu není jasně vidět jaký odklon je ideální ale pravděpodobně bude mezi 0° - 2° .



Obrázek 11: Graf závislosti boční síly na úhlu skluzu pro různý odklon.

2.4.2 Podélná dynamika

Pro použité pneumatiky data pro podélnou dynamiku bohužel neexistují protože institut nezvládne takovou velikost ráfku pohánět. Na následujícím grafu Obrázek 12 lze vidět jak by taková charakteristika mohla vypadat.



Obrázek 12: Graf závislosti dopředné síly na míře prokluzu převzato z [8].

Z grafu vyplývá, že maximum se vždy nachází pouze při určitém prokluzu. Z těchto dat je možné získat ideální prokluz, který se pak může použít v algoritmu kontroly trakce.

Při kombinaci grafů Obrázek 12 a Obrázek 9 získáme frikční elipsu, která popisuje chování při všech variantách zatížení. Z frikční elipsy také vyplývá, že při maximální

dopředné síle pneumatika nedokáže generovat již žádnou boční.

2.5 Tlak v pneumatice

V průběhu závodu dojde k zahřátí pneumatiky a tedy i plynu, kterým je pneumatika napuštěna. Pokud zanedbáme změnu tvaru (objemu) pneumatiky při změně tlaku, můžeme tak uvažovat systém za isochorický. Zákon ideálního plynu po úpravě vypadá následně

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} \quad (6)$$

kde P_n je tlak a T_n je termodynamická teplota.

V grafu jsou další křivky pro konstantní relativní vlhkost. Tento výpočet je realizován podle zákona o parciálním tlaku plynu, kdy se celkový tlak skládá z parciálních tlaků jednotlivých plynů tzv. Daltonův zákon.

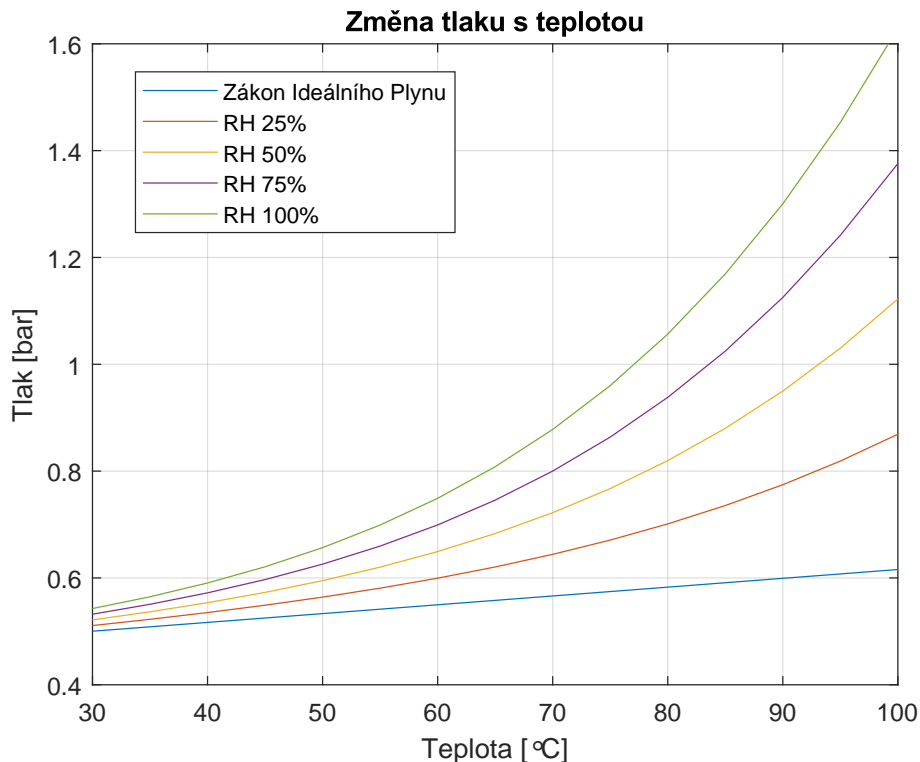
$$p = p_1 + p_2 \quad (7)$$

Tlak páry tedy spočteme

$$p = p_p(T) \cdot RH \quad (8)$$

kde RH je relativní vlhkost, $p_p(T)$ je tlak páry v závislosti na teplotě převzaty z [5].

Následující graf Obrázek 13 zobrazuje změnu tlaku při počátečním tlaku 0,5 bar při 30 °C.



Obrázek 13: Změna tlaku podle rovnice ideálního plynu pro různá RH.

Křivka pro zákon ideálního plynu je čistě lineární, a proto změna tlaku je snadno předvídatelná. Pokud budeme chtít udržet tlak v pneumatice v jejím ideálním pásmu, musíme podle toho zvolit počáteční tlak. Při započítání relativní vlhkosti se tlak v pneumatice může dosti razantně změnit jak je vidět z grafu Obrázek 13. Nicméně graf může dosti zkreslovat realitu, protože se jedná o křivku s konstantní relativní vlhkostí, což znamená, že musí docházet k přeměně vody na páru, protože při vyšší teplotě dokáže vzduch udržet více molekul vody. Protože do pneumatiky se musí dostat voda v kapalném skupenství, která se při počátečních podmínkách nevypařila. Tato přídavná vlhkost se tam dostane pomocí pasty (běžně je na vodní bázi) používané na nasazení pneumatiky na ráfek. Napuštění pneumatik pomocí průmyslového dusíku je jedna z variant jak stabilizovat vlhkost v pneumatice, protože průmyslový dusík je zbaven vlhkosti. Druhá možnost je použití pasty, které není založena na vodní bázi.

2.6 Sběrnice vozidla

V automobilovém průmyslu se používají sběrnice jako CAN, LIN či FlexRay. V poslední době se používá i optické vlákno nebo speciální varianta automotive ethernetu pro přenos informací. Sběrnice CAN je dvoudrátová diferenciální sběrnice s protokolem, který zajišťuje CMA/CA. Jeden z novějších standardů je CAN FD a jedná se o vylepšení standardu pro podporu flexibilní datové rychlosti. Jedna z nevýhod CANu je že nezajišťuje stabilní čas potřebný pro odeslání zprávy kvůli arbitraci. Každá zpráva má svoje identifikační číslo, podle kterého se řídí arbitrace a pokud existuje zpráva s nižším číslem tak vždy dostane přednost před zprávou s nižší prioritou (tedy vyšším identifikačním číslem). Typická nejvyšší rychlost CAN sběrnice je 1 Mbit s^{-1} .

Sběrnice FlexRay je navržena pro vyšší datové toky a je určena pro aplikace kde je důležitá stálá časová odezva a tedy v časově kritických aplikacích.

Formule obsahuje dvě CAN sběrnice a obě jsou dostupné v celém kabelovém svazku. Jedna ze sběrnic je použita pro kritické zprávy např. řízení měničů a chybové zprávy jednotek. Tato sběrnice má rychlost 500 kbit s^{-1} . Druhá CAN sběrnice má rychlost 1 Mbit s^{-1} a jsou na ní zejména senzory, které produkují větší datový tok.

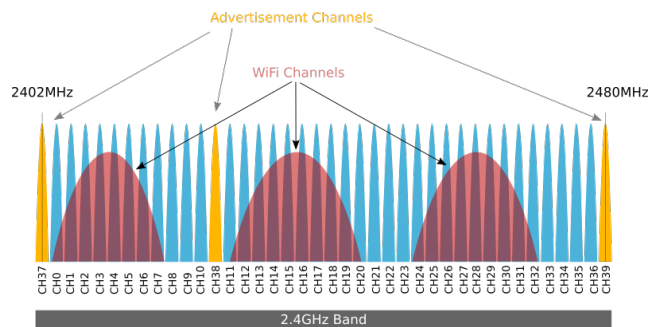
2.7 Bezdrátové technologie

Existuje několik bezdrátových technologií vhodných pro senzory, které posílají malé objemy dat jen jednou za čas. V IoT se používají právě tyto technologie, které umožňují mít zařízení (senzory, domácí automatizace atp.) napájené z knoflíkové baterie a bez její výměny vydrží fungovat i několik let. Obvykle tyto zařízení posílají málo dat, a často se může jednat o síť takových zařízení.

2.7.1 Bluetooth Low Energy (BLE)

Bluetooth LE započal svojí cestu s Bluetooth 4.0 specifikací, kdy hlavní zaměření je na nízkopříkonové aplikace a zejména zaměření na IoT. Komunikace probíhá na stejné frekvenci jako standardní Bluetooth a to 2,4 GHz, ale tím kompatibilita standardu končí. Fyzická vrstva využívá frekvenční modulaci GFSK s frekvenčním skákáním. Významně byl snížen odběr a taktéž cena při snaze o zachování komunikační vzdálenosti. Standard je nastaven tak, že preferuje krátké spojení při, kterém

se pošle maximum dat. Možné operace na úrovni spojové vrstvy lze rozdělit na Inzerci (Advertisement), Vyhledávání (Scanning) a Spojení (Connection)[9].



Obrázek 14: Frekvenční rozložení kanálů BLE převzato z [10].

Metoda posílání dat je pomocí inzerce, kdy interval je od 20 ms do 10s, možné kanály jsou 37/38/39. Tyto kanály jsou zvolené tak, aby byly mimo vytížené pásmo použité pro WiFi. Zbýlých 37 kanálů je použito pro přenos dat po navázání spojení. Při inzerci je nejspolehlivější použít všechny tři kanály, ale tím se zvýší spotřebovaný výkon. Datový packet (payload) má velikost od 0 do 31 bajtů pro primární inzerci a pro sekundární 0- 255 bajtů [11].

Vyhledávání je operace, při níž se poslouchají příchozí inzerce, ze kterých můžeme zjistit, jaké zařízení se nacházejí v okolí. Vyhledávání lze provozovat ve dvou módech a to v aktivním nebo pasivním. V pasivním módu se pouze poslouchá jeden kanál a periodicky se cykluje mezi kanály. Při aktivním režimu se ještě zařízení doptá na další informace.

Připojení umožňuje poslat spolehlivě data díky CRC a možným znovu odesláním paketu. Data se posílají v intervalu, na kterém se zařízení musí dohodnout při vytváření spojení. Tento interval nutně definuje datovou propustnost.

Role zařízení v BLE topologii jde rozdělit do těchto kategorií.

- Inzerent - Zařízení posílá inzerci ale nemůže je přijímat.
- Vyhledávač - Zařízení poslouchá jen inzerci.
- Periferie - Zařízení připojení k jednomu nebo více centrálních zařízeních.
- Centrální zařízení - Je připojeno k periferním zařízením a v jednom okamžiku může být připojeno až ke 20.
- Hybrid - Zařízení může poslouchat i posílat inzerci ale záleží na dodavateli.

GATT (Generic Attribute Profile) definuje, jak si zařízení vyměňují uživatelská data v rámci charakteristik nebo služeb [11]. Charakteristika slouží jako kontejner pro uživatelská data a má vlastní UUID (lze použít předdefinované). Charakteristika dále obsahuje parametry přístupu: čtení, zápis, notifikace. Notifikace indikuje připojenému zařízení, že se data změnila a automaticky dojde k vyčtení.

2.7.2 Zigbee

Zigbee je protokol, který je určený do aplikací s nízkým datovým tokem, kde se snaží konkurovat právě BLE. Tento protokol je opět definován na frekvenci 2,4GHz a ještě ve volném pásmu 868 MHz. V 2.4 GHz pásmu má pouze 16 kanálů s šířkou 2 MHz

a použitá modulace je OQPSK [12]. Nízkopříkonové MCU velmi často zvládají více protokolů díky jednotné frekvenci a zařízení mohou podporovat BLE i Zigbee.

- Koordinátor (ZC) - V síti je pouze jeden koordinátor a může fungovat též jako most k dalším sítím.
- Router (ZR) - Přeposílá data dalším zařízením.
- Koncové zařízení (ZED) - Většinu času je v spánku a nepřeposílá data dál.

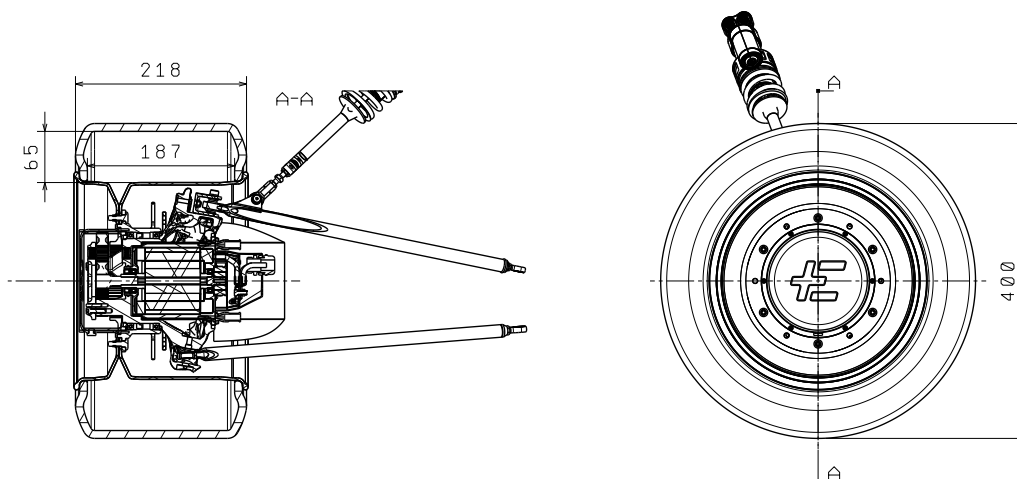
Hlavní zaměření tohoto protokolu je pro síť s mnoha zařízeními (např. domácí automatizace)[12]. Při použití zařízení v módu routeru je výhoda vytvoření sítě senzorů, ale zvyšuje se tím odběr jednotlivých zařízení.



3 Realizace HW

Navržené bezdrátové teplotní senzory v této práci budeme rozlišovat jako interní, které jsou uvnitř pneumatiky a externí umístěné na rámu formule. Jeden z požadavků systému je snadná přenositelnost mezi generacemi formule, protože podvozek se může velmi odlišovat a problém nastavení bude i nadále přetrvávat. Standardně se ve vozidlech nachází několik sběrnic různých typů, ale nejčastěji se jedná o sběrnice CAN, LIN nebo Flexray, ovšem pro potřeby formule stačí pouze dvě CAN sběrnice.

Použité ráfky jsou o velikosti 10" s nízkoprofilovou pneumatikou o šířce 190 mm (rozměry lze vidět na Obrázek 15). Nicméně pneumatika se může deformovat a tedy 190 mm je velikost při nezatíženém stavu ovšem při zatížení se může ráfek pohybovat v pneumatice do stran a tedy se jedná spíše o minimální sledovací plochu. Požadovaná obnovovací frekvence je dosti závislá na celkových požadavcích např. při nutnosti sledování probržděných míst na pneumatice bychom museli být schopní udělat několik vzorků při jednom otočení kola. Vnější obvod pneumatiky je okolo 63 cm a pro rychlost 125 km h^{-1} je frekvence otáčení kola 55 Hz. Při vzorkování s touto frekvencí bychom dostali snímek vždy ve stejném místě, a proto musí být aplikován vzorkovací teorém. Minimální vzorkovací frekvence je okolo 110 Hz pro maximální otáčky. Pokud nebudeme trvat na požadavku rekonstrukce povrchu, tak frekvence snímání povrchu by se měla pohybovat v stovkách milisekund.



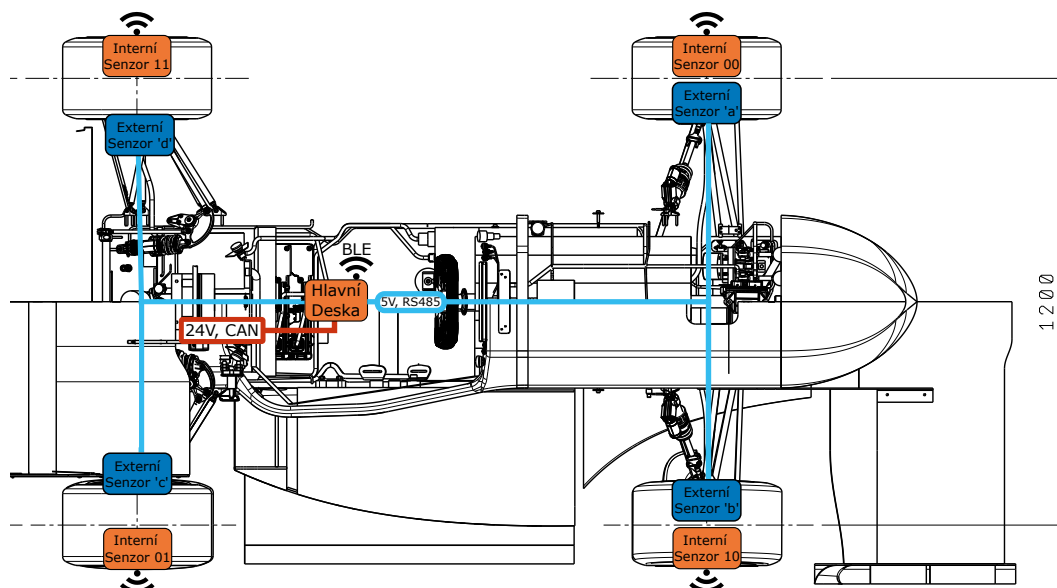
Obrázek 15: Výkres kolové sestavy.

Měřicí systém lze rozdělit na dvě hlavní části a to na část, která je součástí karoserie a rotační části vozidla. Kvůli jednoduché synchronizaci dat z měření pneumatik a ostatními senzory je ideální řešení data posílat na sběrnici CAN v autě, protože komunikace je logována a celková synchronizace je zajištěna. Empirický teplotní rozsah snímání by měl být mezi $0 - 130 \text{ }^\circ\text{C}$.

Z důvodu nepřítomnosti sběrnic přímo u kol je nutnost pro přidání další sběrnice, která bude sloužit pouze pro propojení jednotlivých sensorů s hlavní deskou, která data přešle na CAN. Tato sběrnice by měla být odolná proti rušení, proto byla zvolena sběrnice RS485 která je diferenciální a tedy odolná vůči rušení.

Pro senzory, které jsou zabudovány v kolech, přichází v úvahu pouze bezdrátové spojení. Toto spojení by mělo být energeticky nenáročné, aby sensor mohl být napájen z malé baterie a taktéž aby byla co nejmenší klidová spotřeba. Pro přenos

je zvolen standard Bluetooth LE který je určen přímo pro nízko-výkonové aplikace.



Obrázek 16: Blokové schéma měřicího systému.

3.1 Senzory

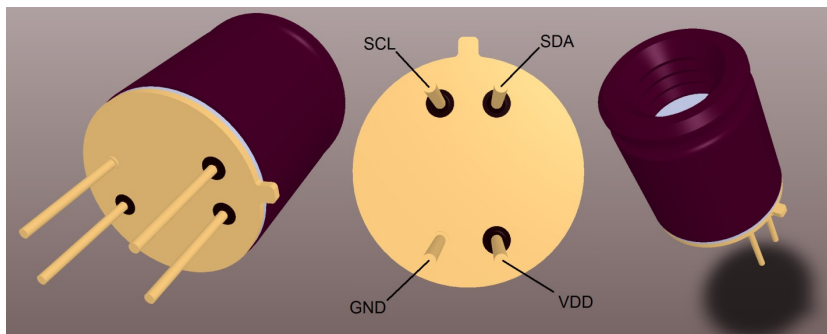
3.1.1 IR Senzor

Pro získání smysluplných informací z teplotních dat, je nutné měřit teploty minimálně ve třech bodech pneumatiky. Čím více bodů se měří, tím lépe lze určit teplotní rozdíl. Bezkontaktní senzory teploty jsou nejčastěji jednobodové, nicméně prodávají se i senzory, které měří celý rámeček bodů. Senzory, které mají i rozlišení, často bývají cenou řádově výše než ty jednobodové. Uvažovaný výběr lze vidět v příloze Tabulka 1: Tabulka možných senzorů teploty..

Tabulka 1: Tabulka možných senzorů teploty.

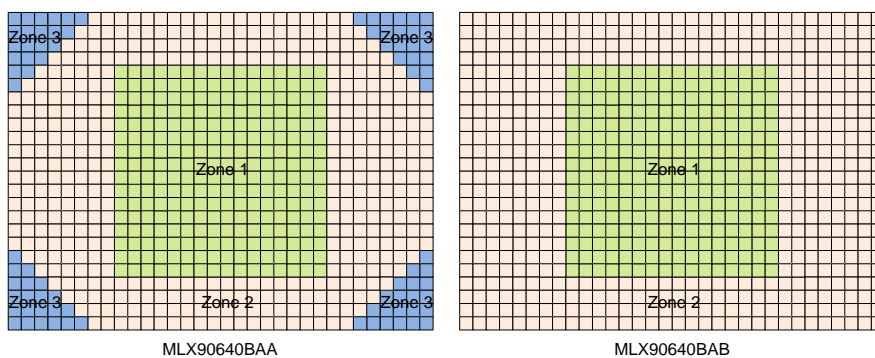
Výrobce	Název	Rozsah[°C]	Rozlišení	FOV [°]	Periferie
Melexis	MLX90640	-40 - 300	32 × 24	110 × 75	I2C
Melexis	MLX90614	-40 - 300	1	35	I2C
Texsense	INFKL 150	0 - 150	1	22	Analog
FLIR	Lepton 2.5	-10 - 400	80 × 60	51 × 63	SPI

Pro externí měření teploty byl vybrán senzor Melexis MLX90640(viz. Obrázek 17), který poskytuje rozlišení 32 × 24 pixelů. V této aplikaci by stačil pouze pixelový proužek pro odečítání teploty, nicméně cenově vychází z všech variant nejlépe (pokud budeme uvažovat, že u jednobodových jich bude muset být použito více). Maximální obnovovací frekvence tohoto senzoru je sice 64 Hz, ale jedná se o frekvenci půl snímku a tedy frekvence obnovy celého snímku je 32 Hz, a proto je vždy půlka snímku vzorkována v jiný čas.



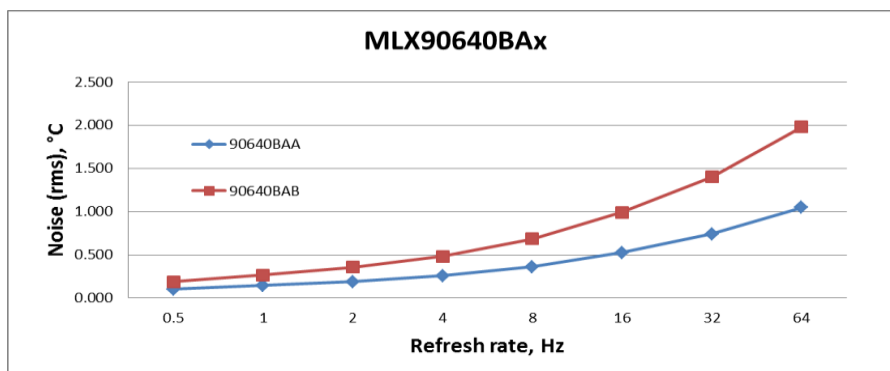
Obrázek 17: IR senzor teploty Melexis 90640 převzato z [13].

Výrobce nabízí dvě varianty s odlišnými FOV a to $110 \times 75^\circ$ a $55 \times 35^\circ$. Vybrán byl senzor s menším FOV, protože podle katalogového listu výrobce má více homogenní přesnost mezi pixely jak je uvedeno na Obrázek 18. Celková nepřesnost by neměla přesáhnout $\pm 1.5^\circ\text{C}$.



Obrázek 18: Graf přesnosti pixelů pro senzory s různými FOV převzato z [13].

Senzor s menší FOV má také lepší charakteristiky z vzorkovací frekvence a šumu (viz. Obrázek 19). Výrobce taktéž zmiňuje, že je šum menší při vyšších teplotách.



Obrázek 19: Graf závlosti obnovovací frekvence a šumu převzato z [13].

Jedna z charakteristik senzoru je, že v průběhu let vyhodnocená teplota driftuje ($\pm 3^\circ\text{C}$) od reálné, a tak bude lepší, když se se bude porovnávat teplota relativně než absolutně. K termální stabilizaci může dojít až 4 minuty od zapnutí (dosahuje definované přesnosti). První validní data jsou k dispozici po 40 ms a k tomu nastavený

obnovovací čas. Základní nastavení frekvence je 2 Hz a tedy musíme počkat 500 ms na první data. Toto nastavení lze změnit, ale k aplikaci nového času dojde až po uplynutí předchozího. Do senzoru lze toto nastavení zapsat trvale. Při použití obnovovací frekvence 64 Hz je nutné počkat dalších 32 ms než se navzorkuje kompletní snímek.

3.1.2 Senzor tlaku

Požadavky na rozsah měření tlaku jsou dané provozním tlakem pneumatiky. Ideální tlak, kdy má pneumatika maximální přenos síly na vozovku, nastává od 0,5 až 0,7 bar nicméně se musí počítat se změnou tlaku v průběhu závodu (viz. Obrázek 13). Taktéž při testování funkčnosti brzd se mohou pneumatiky nafouknout na vyšší tlak než je standardní. Rozsah by tedy měl být od 0,4 bar do 2,5 bar. Z pohledu mechanické zástavby je jednodušší mít absolutní senzor tlaku, protože diferenční by musel být zabudován do ventilku. Pokud bude potřeba servisovat tento senzor, je výhodnější je mít právě na ventilku. Používané závodní pneumatiky jsou navrženy, tak aby měly co nejlepší dopředné a boční charakteristiky často na úkor jejich životnosti. Z tohoto důvodu tedy nevádí horší servisovatelnost, pokud senzor bude fungovat déle než životnost pneumatiky.

Výběr vhodných senzorů lze vidět v Tabulka 2. Na desce se již nachází sběrnice I2C pro propojení s IR senzorem a je tedy preferované ji využít.

Tabulka 2: Tabulka možných senzorů tlaku.

Výrobce	Název	Rozsah [bar]	Cena [CZK]	Rozhraní
TE	MS580305BA01	0 - 5 ± 0,1	550,-	I2C
Melexis	MLX90817	0,5 - 4 ± 0,035	150,-	SENT
Honeywell	X214676MPR	0 - 4,2 ± 0,126	250,-	I2C
Honeywell	ABPDANV060	0 - 2,5 ± 0,006	300,-	I2C, SPI, Analog
NXP	MPXHZ6250A6U	0,2 - 2,5 ± 0,04	330,-	Analog
NXP	FXPS7550DI4T1	0,5 - 5,5 ± 0,023	150,-	I2C, SPI, Analog

Zvolený senzor byl **FXPS7550DI4T1** s rozhraním I2C protože je nejlevnější, ale přesto má slušnou přesnost. Dolní hranice tlaku je také splněná protože k tlaku pneumatiky se připočítává atmosférický tlak.

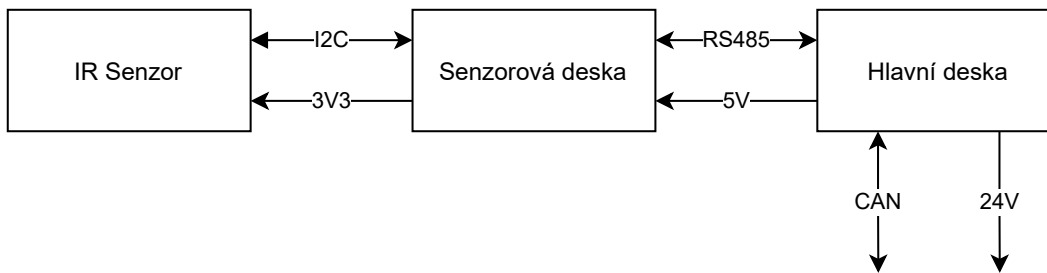
Tento senzor má možnost samotestu, který zkontroluje a verifikuje funkcionalitu převodníku. Díky tomu jde zjistit, jestli senzor posílá validní data. V nízkopříkonové aplikaci je nutné, aby senzor byl zapnut nejkratší možnou dobu a tento samotest by měl být použit spíše minimálně. Výstup z ADC se nachází ve dvou 8 bitových registrech, kde na adrese 0x62 je uloženo spodních 8 bitů a na adrese 0x63 je uloženo horních 8bitů hodnoty změřeného tlaku. Základní adresa senzoru na sběrnici je 0x60. Pro senzor s rozsahem 0,2 - 5,5 bar je $P_{offset} = 28990$ a $P_{factor} = 1400$.

$$P = \frac{P_{raw} - P_{offset}}{P_{factor}} \quad (9)$$

Po 6 ms má senzor poskytovat validní data a pokud bude předcházet vycítání dat verifikace senzoru je to dalších 24 ms. Maximální odběr senzoru podle katalogového listu je 8 mA při 5 V [14].

3.2 Senzorová deska externí

Celková velikost sensorové desky by měla být ideálně co nejmenší, protože pokud se má deska pohybovat u přední nápravy i s kolem musí být uchycená na konstrukci. Tato konstrukce by měla být dostatečně tuhá, aby nepřidávala další chyby snímání a tedy pokud bude i váha řešení nízká, tak vzniklá chyba bude zanedbatelná. Všechny součástky jsou vybrány právě v pouzdrech, který zabírají nejméně prostoru např. QFN¹ a i mají dobré mechanické vlastnosti. Následující obrázek Obrázek 20 vizualizuje propojení mezi systémy.



Obrázek 20: Blokové schéma systému měření externí teploty.

Senzor disponuje I2C sběrnici o frekvenci až 1 MHz. Tato sběrnice je určena pro komunikaci na DPS a tedy připojení sběrnice při této frekvenci do větších vzdáleností nepřipadá v úvahu, protože by byla příliš vystavena rušení, které můžeme u elektrického vozidla očekávat. Tedy je zvolena RS485 sběrnice která splňuje potřebné parametry. Pro tuto sběrnici byl vybrán budič STR485LVQT, který má tyto parametry. Rezistory, které drží sběrnici v logické jedničce, jsou voleny podle rychlosti sběrnice. Pro podporu 400 kHz se v odborné literatuře doporučuje hodnota např. 560Ω , nicméně záleží také na parazitních parametrech aplikace. Při vycházení z aplikační zprávy [15] lze spočítat potřebný odpor pomocí

$$R_b = \frac{t_r}{(0,8473 \cdot C_b)} = 590 \Omega \quad (10)$$

Při nastavení $t_r = 200 \text{ ns}$ a $C_b = 400 \text{ pC}$, které odpovídají frekvenci 400 kHz.

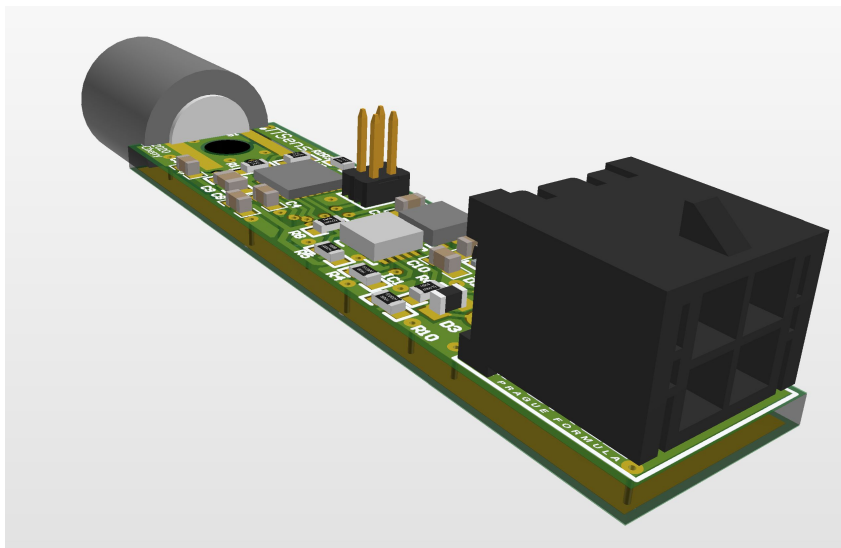
Z hlavní desky je přivedeno napájení 5 V a tedy pro funkci mikrokontroléru musíme převést napětí na 3,3V. Pro tuto funkci může být použito LDO a to standardní LM1117 v pouzdře SOT223. Celkový odběr na 3,3V je 38 mA a je možné použít i slabší zdroj. Pro aplikaci byl zvolen LD3905PU33R, který je také v QFN pouzdře. Mezi jeho výhody patří nízký šum a na výstupu může mít pouze keramický kondenzátor. Při návrhu zdroje musíme uvažovat i o délce vodiče, který je připojen k hlavní desce. Tento kabel může vytvářet parazitní indukčnost, která může být velmi nežádoucí při použití keramických kondenzátorů na vstupu. Protože se při spínání uloží energie do parazitní indukčnosti, tak může dojít k překmitu napětí na vstupu zařízení a tedy jeho destrukci [16]. Řešení existuje několik např. místo keramického kondenzátoru použít kondenzátor s vyšším sériovým odporem. Na desce ale není tolik místa na tento kondenzátor. Do série umístíme malý odpor $\approx 0,5 \Omega$ tím se dostatečně zatlumí možné kmitání.

Výběr MCU je velmi důležité nepodcenit z pohledu výsledné aplikace, aby pak nemusel být kód optimalizován např. na velikost použité paměti. Senzor poskytuje

¹Bezvývodové

32×24 pixelů, tedy celkem 768 pixelů. Ze senzoru získáváme data ve formě výstupu z ADC, a tak se nejedná o finální teplotu. Pro získání požadované teploty musíme z paměti vyčíst několik kalibračních konstant (pro každý pixel) a provést výpočet. Výpočet není triviální a obsahuje mnoho kroků. Pokud ale sečteme potřebnou velikost paměti, všechny konstanty a proměnné, které jsou potřebné pro výpočet, tak získáme požadavky na velikost FLASH 6400 bajtů a RAM 6393 bajtů. Kvůli zmenšení rozměru desky je použit interní oscilátor mikrokontroléru.

Požadavky na podporu sběrnice I2C a UART (RS485) jsou základem při výběru mikrokontroléru. Jeden z důležitých požadavků je minimální velikost MCU. Možnosti nabízených pouzder, které jsou ještě možné ručně připájet (vyřadíme BGA pouzdro), jsou *SO8* a *QFN*. Fakticky nejmenší pouzdro je 20 pinové QFN V tomto pouzdře disponuje pouze 2 kB RAM a 8 kB (až 16 kB) FLASH. To bohužel nesplňuje požadavky potřebné pro výpočet teploty. Při použití 28 pinové QFN pouzdra je výběr ve velikosti paměti násobně vyšší. Vybrán byl mikrokontrolér STM32G071GB, který disponuje 128 kB FLASH pamětí a 36 kB RAM pamětí.



Obrázek 21: Vizualizace externího senzoru teploty.

Vizualizace navržené DPS je vidět na Obrázek 21 kde v předu je IR senzor, uprostřed je MCU, převodník a v zadní části systémový konektor pro připojení k externí desce pomocí sběrnice RS485. Kompletní schéma sensorové desky je k dispozici v příloze A.1.

3.3 Senzorová deska interní

Deska je umístěna na ráfku přímo v kole, proto jediná možnost připojení senzoru k sběrné desce je přes bezdrátové spojení. Při návrhu se musí brát v potaz, že fyzický přístup k desce je minimální a tedy musí vydržet fungovat po delší období bez nutnosti servisu. Pro tento typ použití bylo vyvinuto několik bezdrátových standardů např. Bluetooth LE, LoRa, Zigbee.

Umístění senzoru způsobuje periodický pohyb vůči přijímači. Dopplerovský jev se může negativně projevit při příjmu a posun frekvence vypočítáme

$$f' = f \left(1 \pm \frac{v}{c} \right) \quad (11)$$

kde f' je posunutá frekvence, f je původní frekvence, v je rychlost pohybu, c je rychlost světla. Pro rychlost bude vždy platit že $v \ll c$ a posun ve frekvenci bude v desetinách Hz, což při frekvenci 2.4 GHz opravdu není problém.

Pro nízko-příkonové aplikace existují speciální SoC, které obsahují všechny potřebné periferie pro bezdrátovou komunikaci. Mezi přední výrobce těchto čipů můžeme zařadit Nordic Semiconductor nebo Espressif. Velký výběr je v oblasti modulů, které integrují čip od jiného výrobce. Modul má vyřešené impedanční přizpůsobení pro připojení antény (interní či externí) nebo další periferie. Při použití hotového modulu se návrh velmi zjednoduší. Následující Tabulka 3 obsahuje uvažované moduly a porovnání z pohledu standardu nebo odběru.

Tabulka 3: Tabulka možných BLE modulů.

Výrobce	Název	Chipset	Technologie	TX [dBm]	I_{max} [mA]	Deep sleep
Espressif	ESP32	ESP32	WiFi, BLE	12	40	150 μ A
Wurth	Setebos-I	nRF52840	BLE 5.1	6	18,9	400 nA
Silicon	BGM220	EFR32BG22	BLE 5.2	8	10,6	1,4 μ A
uBlox	NORA-B106	nRF5340	BT	13	22	1,5 μ A
Laird	BL652	nRF52832	BLE 5.0	4	7	400 nA
Cypress	CYBLE-416045	PSoC63	BLE 5.0	4	10	14 μ A

Z pohledu spotřeby nejlépe vychází modul BL652 s čipem nRF52832. Tento modul je vyráběn s možností antény na plošném spoji nebo s konektorem pro připojení externí antény.

Senzor, použitý na měření externí teploty, má odběr 20 mA a to je pro použití s knoflíkovou baterií trochu příliš při zohlednění odběru dalších periférií. Pro vnitřek je použit senzor s menším počtem pixelů, který má asi o polovinu menší odběr. V Tabulka 4 lze vidět porovnání dvou typů senzorů. Výrobce má opět připravenou knihovnu pro výpočet teploty [17].

Tabulka 4: IR měření teploty pro interní senzor.

Výrobce	Číslo	Rozlišení	FOV	Odběr
Melexis	MLX90640BAA	32 \times 24	110 \times 75	23 mA
Melexis	MLX90641BCA	16 \times 12	110 \times 75	12 mA

Pro zjištění životnosti zařízení musíme znát celkový odběr při zapnutém a vypnutém stavu. Tabulka Tabulka 5 obsahuje odběry všech komponent na desce.

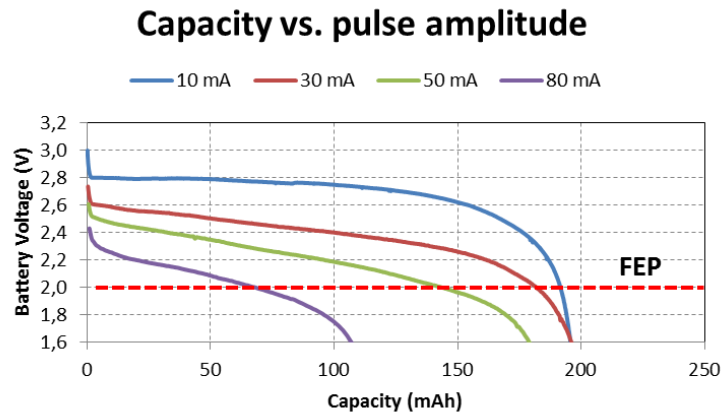
Tabulka 5: Odběr jednotlivých komponent desky.

Zařízení	Název	Čas [ms]	Odběr max.	Odběr typ.	Uspaný odběr
Teplota	MLX90641	110	14 mA	12 mA	-
Tlak	FXPS7550	2	8 mA	-	-
Zdroj	TPS60205	0,5	70 μ A	1 μ A	0,05 μ A
MCU	BL652	0,5	17 mA	\varnothing 3 - 500 μ A	400 pA

Dominující část váhy celého zařízení je právě její zdroj energie a proto výběr baterie je kritická část. Nejznámější baterka pro použití v nízko-příkonových aplikacích

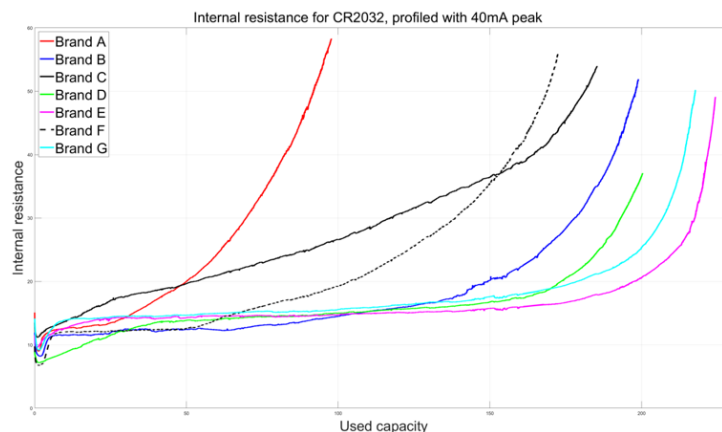
je právě knoflíková konkrétně CR2032. Celý název přímo určuje použitou chemii, tvar, šířku a výšku baterky.

Baterie CR2032 mají katalogovou hodnotu kapacity udávanou jako 200 mAh a rozsah napětí 3 - 2 V. Kapacita je závislá na vybíjecím proudu, což je dost nepříjemná komplikace. Baterie lze používat do 30 mA odběru jinak majoritně ubíráme baterii životnost viz. Obrázek 22. Toho lze docílit minimalizací aktivní spotřeby zařízení, a proto byl například použit MLX90641 místo MLX90640 kvůli skoro polovičnímu odběru senzoru.



Obrázek 22: Kapacita baterie CR2032 pro různá zatížení převzato z [18].

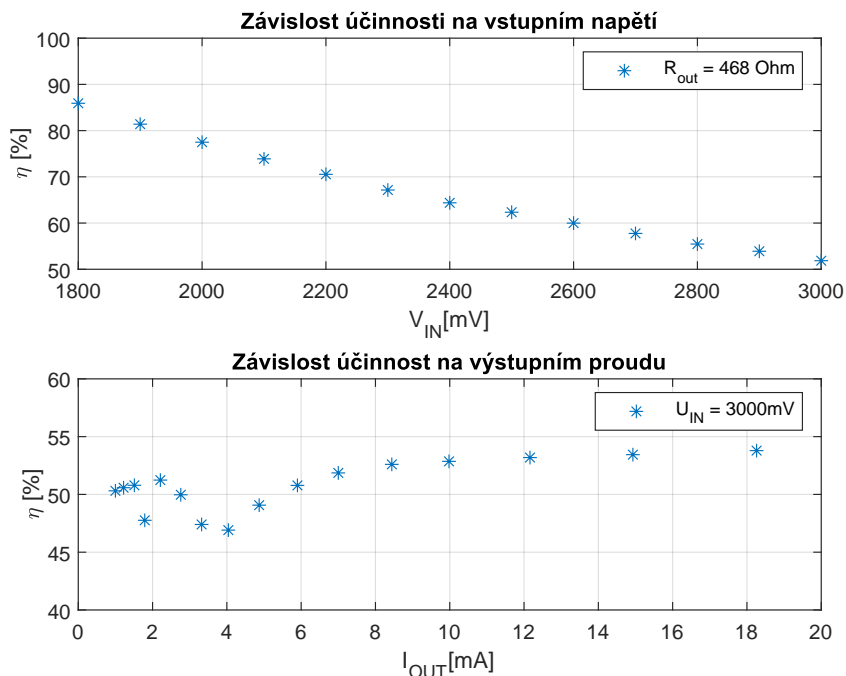
Problematická je taky kvalita baterií od různých výrobců, které se v parametru vnitřního odporu velmi liší. Pokud má baterie vyšší vnitřní odpor, tak při vyšším zatížení klesá napětí více než u baterií s nižším vnitřním odporem. Vnitřní odpor souvisí i s účinností baterie. Pokud baterie v zařízení nevydrží předpokládanou dobu je možné, že baterie nemá parametry, které výrobce udává viz. porovnání v Obrázek 23 různých výrobců A - G podle kvality baterie, kde nejlepší výsledek má značka E



Obrázek 23: Interní odpor CR2032 u různých výrobců převzato z [19].

Pro senzory na desce potřebujeme zdroj 3,3 V a zvolená baterie má rozsah napětí 3 - 2 V, a proto se pro zdroj musí zvolit topologie pro zvýšení napětí. Nejpoužívanější možnost bude použít zapojení boost měniče anebo použití nábojové pumpy. V první verzi byla použita nábojová pumpa TPS6020 s rozsahem vstupního napětí 1,6 - 3,6 V

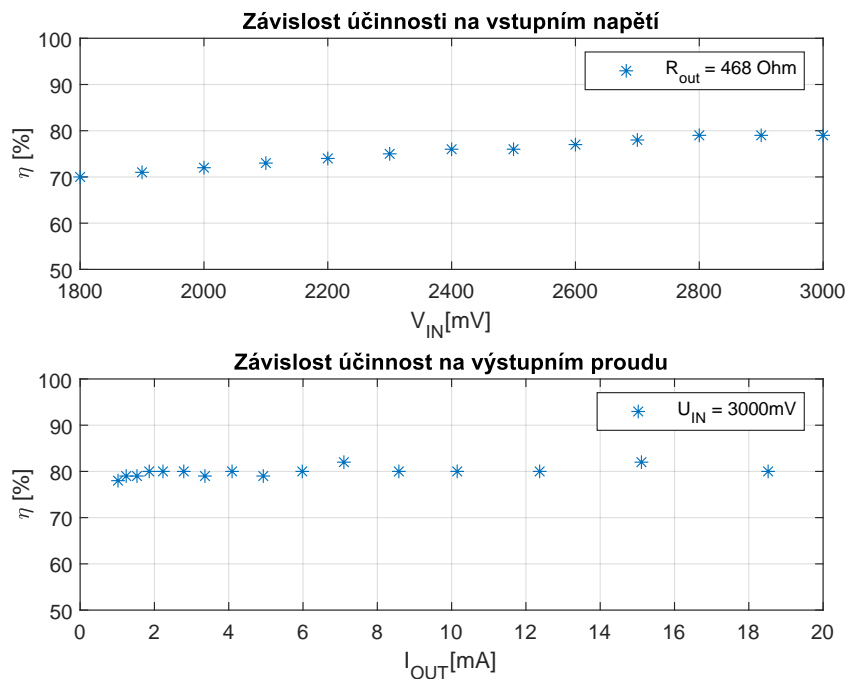
a maximálním výstupním proudem 100 mA. Ta podle katalogového listu slibuje až 90 % účinnost ale důležité je slovo "až". Následující graf ukazuje účinnost zdroje, která při 3 V začíná na $\approx 50\%$ a při 2 V na $\approx 80\%$. Nejedná se o dobrou účinnost. Následující grafy Obrázek 24 obsahují změřenou účinnost zdroje.



Obrázek 24: Grafy účinnosti nábojové pumpy.

Jedna z výhod je teoreticky malá plocha na plošném spoji díky absenci cívky. Velmi nízký odběr při vypnutém zdroj (typicky 50 nA) může dělat z tohoto zdroje zajímavou volbu.

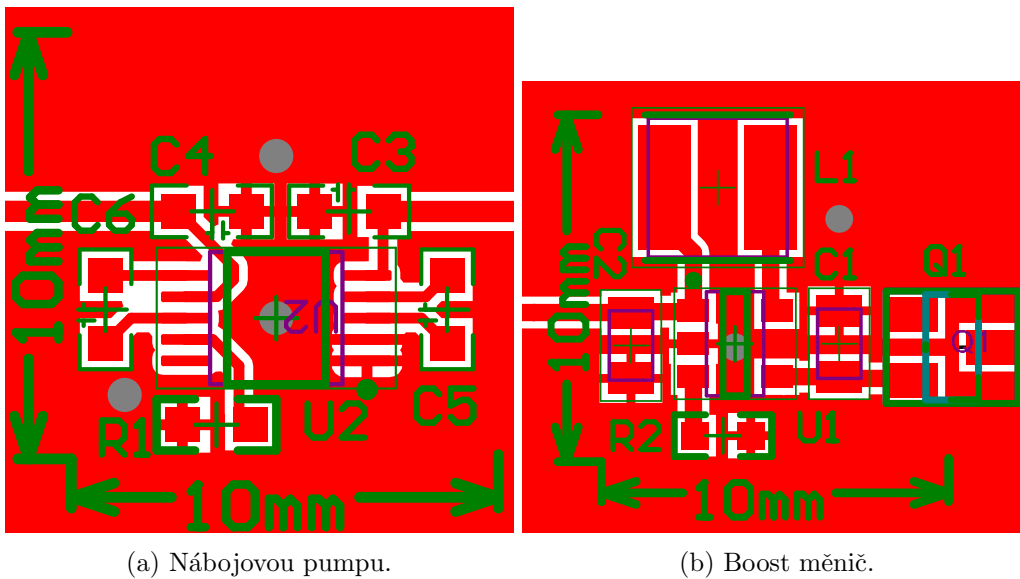
Pro spínaný Boost měnič byl zvolen MAX1724, který má vstupní rozsah napájení 0,8 - 5,5 V a maximální výstupní proud až 150 mA. I tento zdroj je určen do nízko-příkonových aplikací a tedy jeho odběr při vypnutém stavu se pohybuje mezi 10 - 500 nA. Katalogový list obsahuje opět slovo "až" 90 % účinnost zdroje a tedy jeho účinnost byla změřena stejně jako u nábojové pumpy Obrázek 25. Zdroj sice nikdy nedosahuje 90% účinnosti, ale za to má účinnost v rozmezí 70 - 80 % a dokáže baterii využít efektivněji.



Obrázek 25: Grafy účinnosti boost zdroje.

Tento zdroj má nevýhodu a tou je, že neodpojuje výstup od vstupu a i přesto, že tranzistor je zavřený, baterie je připojena přes interní diodu tranzistoru na výstupu. Tento zdroj tedy nutně potřebuje změnu. Návrhem je přidání PMOS tranzistoru který odepíná zátěž od výstupu zdroje (měření účinnosti bylo proveden s tímto tranzistorem). Zdroj při odpojené zátěži má odběr kolem $1,5 \mu\text{A}$.

Při výběru malé cívky má Boost zdroj dokonce menší plochu než nábojová pumpa. Vzhledem k tomu, že nábojová pumpa potřebuje 4 kondenzátory pro svojí funkci oproti 3 součástkám pro Boost je jasné, že výhledově může být plocha srovnatelná nebo menší. Porovnání rozložení součástek můžeme vidět na Obrázek 26.

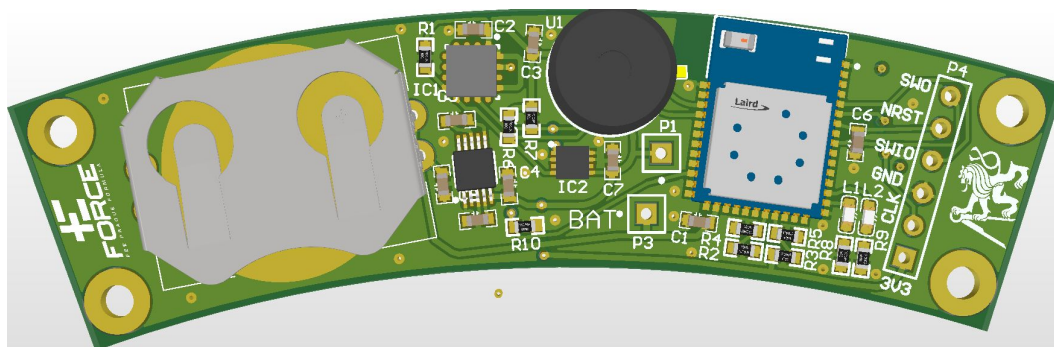


Obrázek 26: Porovnání rozložení součástek na plošném spoji.

Realizace proběhla ještě s verzí, kde je použita nábojová pumpa a ukázalo se několik problémů. Protože zdroj má nízkou účinnost, odebírá více mA než kolik je pro CR2032 vhodné. Použití lepšího zdroje se přímo vybízí ale taktéž snížení maximálního proudu za cenu delšího času měření. Tedy spínat každý senzor vlastním PMOS tranzistorem.

Každé zařízení musí mít jedinečné identifikační číslo, abychom dokázali určit kde je senzor na vozidle umístěn. Pokud bude identifikátor součástí kódu tak se bude muset kompilovat binární soubor pro každý senzor zvlášť. To není vhodná varianta, zejména pokud se jedná o mnoho zařízení. Jedno z řešení je použít piny procesoru k nastavení identifikátoru tak, že se připojí k napájecímu napětí nebo k zemi. Různým osazením se nastaví adresa. Pro 4 senzory potřebujeme takto obsadit 2 piny a použily se piny *SIO4* a *SIO5* (viz. A.3). Pro větší série i toto řešení velmi rychle přestává být výhodné. Ideální varianta je zapsat adresu zařízení na fixní adresu někde na konci FLASH paměti MCU. Identifikátor tedy bude ve, ale mimo firmware.

Velikost desky je kritická, protože v ráfku není příliš místa. Větší baterka než 25 mm už může dělat problémy při nasazování pneumatiky na ráfek. Deska je také přizpůsobena tvaru ráfku, aby bylo využito maximum dostupného místa (viz. Obrázek 27). Deska i s baterií váží pouhých 12 g.



Obrázek 27: Vizualizace interní desky .

3.4 Hlavní deska

Hlavní deska komunikuje s externími senzory po RS485 a vyčítá z nich data a také by měla komunikovat s interními senzory po BLE a všechna data posílat na CAN. Tím bude měření synchronizované s dalšími senzory v autě. Protože měření tlaku v kolech je absolutní, musíme měřit i tlak ambientní, abychom dokázali určit tlak v pneumatice bez atmosférického. Proto se na hlavní desce musí nacházet stejný tlakový senzor jako v pneumatice.

Použité MCU musí mít USART (ideálně s RS485 řízením), CAN periferii a I2C. První verze používala mikrokontrolér STM32F042 ve velmi malém pouzdře TSSOP20. Při přidání interního měření vzešly další požadavky na hlavní desku a zvolené MCU již nebylo dostačující. Následující Tabulka 6 obsahuje srovnání možných MCU z pohledu počtu potřebných periférií.

Tabulka 6: Výběr MCU pro hlavní desku.

MCU	UART	CAN	I2C	BLE	Pouzdro
STM32F042F6	1	1	1	Ne	TSSOP20
STM32F042C6	2	1	1	Ne	LQFP48
STM32WB10CC	1	0	1	Ano	QFN48
BL652	1	0	2	Ano	Modul
ESP32	2	1	2	Ano	QFN/Modul

Jeden z problémů, který nastává při použití BL652 je, že nativně nepodporuje CAN. Velmi často tato zařízení nepodporují CAN, protože to není nízko příkonová sběrnice. Tedy není vhodné MCU od STM, které by podporovalo CAN a BLE. Jediná možnost, které podporuje vše potřebné, je ESP32, protože tento čip umí kromě nízko příkonových protokolů i WiFi (která rozhodně není nízko příkonová).

ESP32 je velmi silné SoC, které je navrženo tak, aby bylo využitelné v mnoha aplikacích a obsahuje dvoujádrový procesor Tensilica Xtensa LX6 CPU [20]. Při vývoji FW se tedy počítá s použitím RTOS, (jedná se o implementaci FreeRTOS [21]) který obstarává funkci na více jádrech. Vývojář sice nemusí použít zmíněnou implementaci, ale musí si pak poradit jak pracovat s druhým jádrem a netřeba dodávat, že knihovny jsou napsané tak, že opět počítají s použitím RTOS.

Pro hlavní desku byla zvolena kombinace STM32F042C6 a modulu BL652 z několika důvodů. První verze obsahuje funkční kód, postavený na knihovnách STM32 které

jsou snadno přenositelné na jiné MCU od STM a BL652 je použito na interních senzorech, a proto bude více přímočaré připojení k těmto sensorům. Další varianta, kterou musí vývojář vzít v potaz, je eliminace unikátních součástek. Nicméně varianta s ESP32 může být zajímavá díky možnostem přenosu CANu přes WiFi, tedy jednoduchou telemetrií. Pro přenos dat mezi mikrokontroléry je použitý UART.

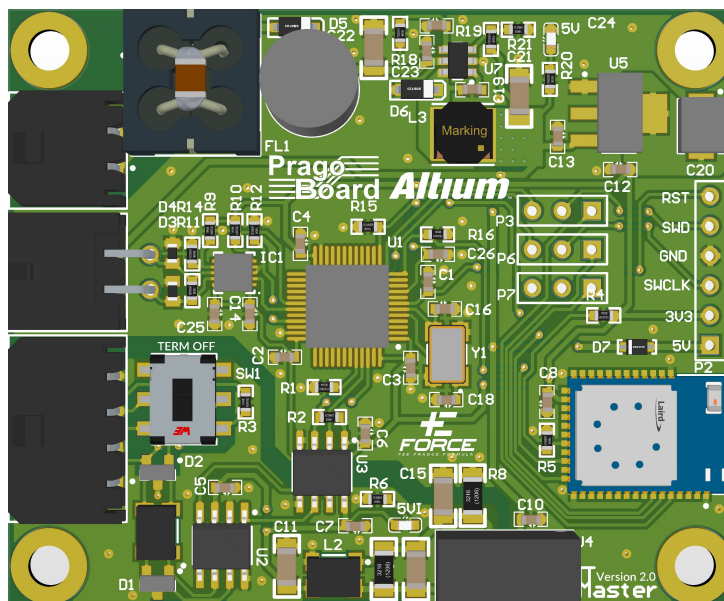
Napájení je zde použito 24 V z palubního napětí, kde na vstupu je použitý EMI filtr kvůli rušení indukovanému na napájecí větvi. V sérii je také dioda jako ochrana proti prepólování a následné destrukci zařízení. Za diodou se nachází 100 μ F elektrolytický kondenzátor, který zde slouží jako zpoždění při odpojení napájení. Zařízení má čas vykonat kritické části kódu, než dojde k vybití kondenzátoru. Ještě před diodou se nachází dělič, kterým se měří vstupní napájecí napětí a MCU tedy dokáže detekovat pokles napájecího napětí. Pomocí spínaného zdroje z 24 V vytváří 5 V, které je pak použito na napájení externích sensorů a také napájení pro izolovaný zdroj a také pro zdroj 3,3 V.

Na desce je realizován izolovaný CAN pomocí digitálního izolátoru a izolovaného zdroje 5 V/5 V. Na desce se nenachází vysoké napětí, a tedy zdánlivě není potřeba izolace. V této aplikaci je velmi silné rušení od spínání výkonových měničů a velmi složité kabelové svazky. V takto složitém systému se mohou uzavírat smyčky a nepředvídatelně šířit rušení. Přestože je CAN diferenciální sběrnice, neznamená to, že musí fungovat v každém případě. Každá jednotka na sběrnici má izolovaný CAN a všechny mají propojenou CANovou zem. Sběrnice musí mít vztažený potenciál k nějaké zemi a tedy je připojena na klasickou zem - pouze v jednom bodě. Tím je dosaženo, že se nevytváří smyčky, kudy se šíří rušení a tedy sběrnice funguje i ve velmi zarušeném prostředí. Na desce se nachází spínač, kterým se zapne terminace (připne se 120 Ω odpor na sběrnici). Terminace na desce je určena pouze při vývoji FW a testování.

Budič RS485 je zde stejný jako u externích sensorů i když u této desky nejsou kladeny stejné nároky na velikost. Konfigurace sítě hraje velkou roli pro dobrou funkci sběrnice. Podle umístění sensorů Obrázek 16 na autě se nabízí použití zapojení sběrnice od hvězdy, ale to není ideální zapojení. Ideální zapojení sběrnice je linka [22] s co nejkratšími odbočkami s terminací umístěnou vždy na koncích.

Na MCU je použita sběrnice I2C na komunikaci se senzorem tlaku.

Výsledná deska je Obrázek 28 51 \times 62 mm veliká.



Obrázek 28: Vizualizace hlavní desky.

3.5 Výsledná realizace

Senzor pro měření externí teploty je u předních kol uchycen za obal elektromotoru, který se při zatačení volantu otáčí i s kolem viz. Obrázek 29a. Tedy i senzor se v každém okamžiku sleduje pneumatiku pod stejným úhlem a na stejnou část. Tento úchyt je svařenec z ocele, a proto uchycení je dostatečně tuhé. Sensory zadních pneumatik jsou uchyceny za zadní křídlo viz. Obrázek 29b. Uchycení celého zadního křídla není dostatečně tuhé, a dochází k jeho vibracím. Protože se hýbe celé zadní křídlo tak může docházet ke zkreslování směřování senzoru na pneumatiku, a proto k ovlivnění celého měření.



(a) Fotografie uchycení senzoru předních pneumatik. (b) Fotografie uchycení senzoru zadních pneumatik.

Obrázek 29: Uchycení senzorů na vozidle.

Uchycení interních senzorů je velmi náročný úkol z několika důvodů. Ráfky mohou být realizovány jako jednodílné nebo dvoudílné. Dvoudílné ráfky mohou mít problém s unikáním vzduchu okolo šroubových spojů. Z tohoto důvodu jakékoliv mechanická úprava ráfku nepřichází v úvahu. Použité ráfky na testování jsou vyrobené z hořčíku a jejich povrchová úprava je velice důležitá.

Na uchycení senzorů existují upravené ventilky, které v sobě mají šroubový závit, kterým lze toto zařízení uchytnit. Takový ventilék je bohužel příliš dlouhý a překáží při nasazování pneumatiky.

Dalším problémem je teplota ráfku, která je silně závislá na konstrukci kolové sestavy a tak se může provozní teplota lišit. V závodě celá sestava může dosahovat i 70 °C.



Obrázek 30: Fotografie namontovaného senzoru.

Na ráfek Obrázek 30 je přilepen 3D tisknutý díl z materiálu PETG (s pevností v tahu 30 MPa [23]), který obsahuje samotnou elektroniku bezdrátového měřiče teploty a přilepený pomocí dvousložkového epoxidového lepidla Loctite EA9466, které má vydržet teplotu do 120 °C [24], ale již při 40 °C má lepidlo tuhost pouze 50 % (100% je při 22 °C). Síla, kterou lepený spoj zvládne (plocha spoje je $\approx 1563 \text{ mm}^2$ a pevnost v loupání $5,4 \text{ N mm}^{-2}$) je $\approx 8,4 \text{ kN}$. Celková váha zařízení i s tisknutým krytem je 26 g (spodní část výtisku váží 9 g a víko 5 g). Síla působící na desku při rychlosti 120 km h^{-1} lze vypočítat podle

$$F_d = m \cdot \omega^2 \cdot r \quad (12)$$

kde m je váha senzoru, ω úhlová rychlost, r poloměr. Maximální teoretická rychlost bývá okolo 125 km h^{-1} při nezapočítání odporů a tedy reálně dosažitelná je právě těch 120 km h^{-1} . Maximální síla působící na senzor s horním krytem je $\approx 62 \text{ N}$ a na celé zařízení $\approx 95 \text{ N}$.

Hlavní jednotka, která posílá zprávy na CAN, má opět vlastní 3D tisknutou krabičku (viz. Obrázek 31), která jí chrání proti mechanickému poškození.



Obrázek 31: Fotografie realizace hlavní desky.



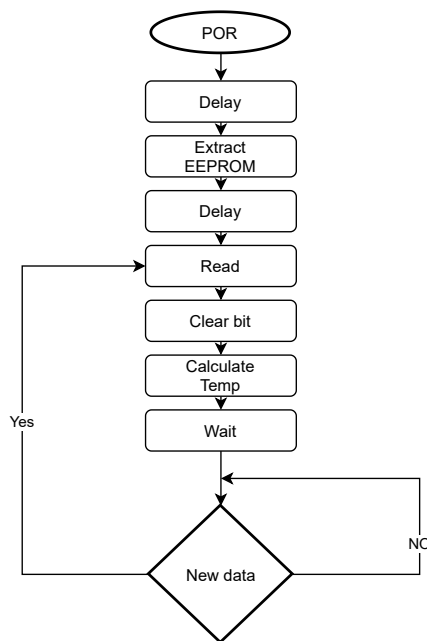
4 Realizace FW

4.1 Externí měření teploty

Senzorové desky komunikují s IR senzorem po I2C sběrnici rychlostí 400 kHz ale senzor zvládne i frekvenci 1 MHz. Podle výrobce vyčítání z EEPROM senzoru má být maximálně při frekvenci 400 kHz, i když I2C podporuje 1 MHz. Pro přenos 768 pixelů (16b) při maximální obnovovací frekvenci je potřeba přenést $393\,216 \text{ bit s}^{-1}$. Pokud se do výpočtu započítají nezbytné bity pro komunikaci, tak se dostáváme na pomyslných 400 kHz. Nicméně maximální obnovovací frekvence je sice 64 Hz, ale jedná se o změnu poloviny pixelů a tedy celý snímek se obnoví o frekvenci 32 Hz. Pokud bychom snížili počet dat potřebných pro přenos (přenášeli pouze nový snímek) nebo vždy přenášeli pouze kompletně nový snímek.

Zápis do adresy probíhá nejdříve posláním adresy zařízení (7b) a osmý bit určuje, jestli se zapisuje nebo vyčítá. Poté se posílá adresa do paměti, kam se bude zapisovat (16b), kde data mají endianitu typu Big-endian. Poté se posílají data stejně jako adresa paměti. Při čtení se pošle adresa zařízení, ale osmý bit je nastaven na čtení a poté se pošle adresa paměti odkud se bude číst. Následně zařízení pošle obsah paměti na zvoleném místě.

Doporučené vyčítání dat ze senzoru je znázorněno na následujícím vývojovém diagramu Obrázek 32. V tomto diagramu je znázorněna pauza na ustálení teploty senzoru, kdy po uplynutí by měl senzor již poskytovat validní data.



Obrázek 32: Vývojový diagram vyčítání dat podle výrobce.

Realizace v kódu je následující: použije se časovač s přerušením, který vždy zkontroluje, že jsou dostupná nová data a pokud ano, tak je vyčte. Časovač má nastavenou frekvenci třikrát vyšší než jaká je frekvence senzoru.

Při psaní kódu lze použít dva přístupy a to napsat si maximum kódu vlastnoručně anebo použít knihovny od výrobce, které jsou pod MIT/Apache licencí. Každý z přístupů má několik výhod i nevýhod. V této práci použijeme knihovnu HAL, vyvíjenou výrobcem MCU ST Microelectronics, která obsahuje kód pro všechny

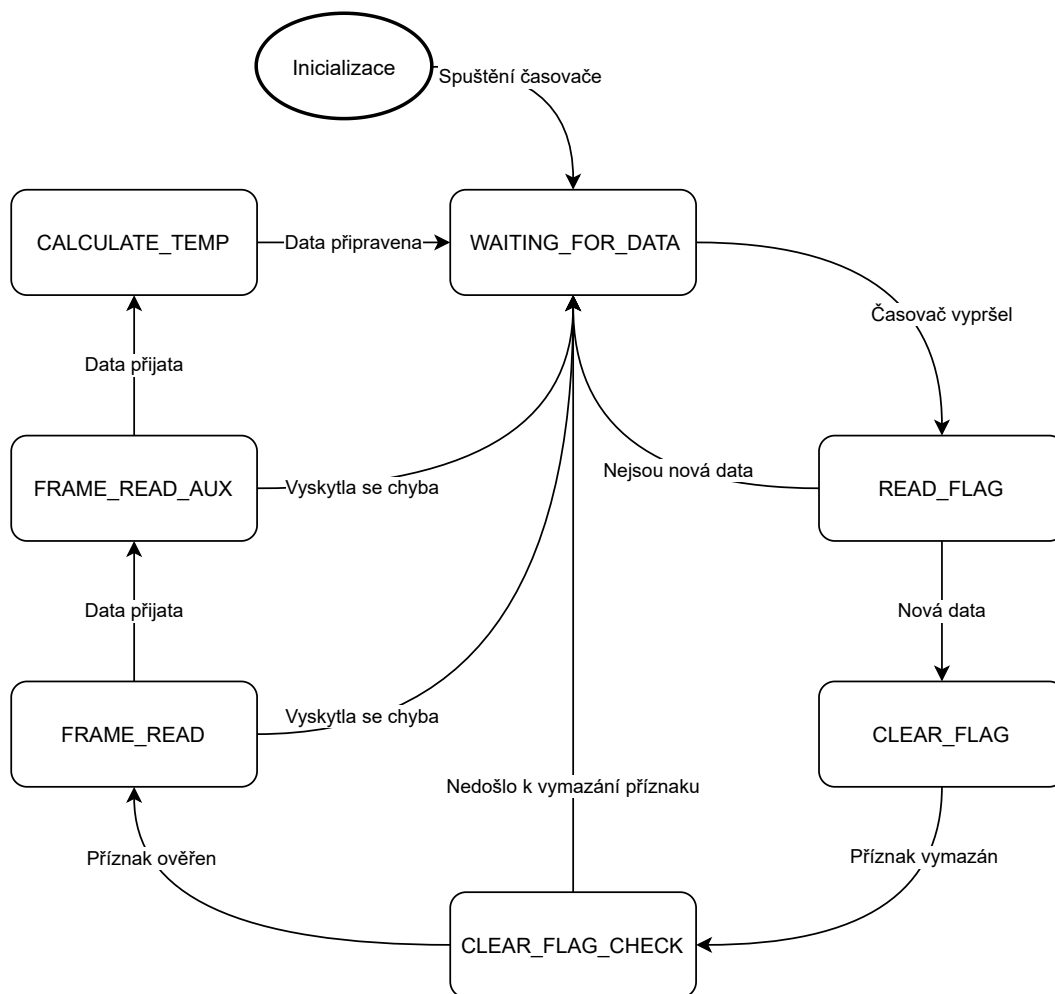
periferie. V této knihovně má většina periferií napsané funkce pro používání v blokovacím režimu s přerušением a s pomocí DMA. Pro lepší využití výpočetního výkonu MCU je lepší používat neblokovací režim a tedy je použito přerušení pro I2C komunikaci.

Pro senzor je nutné vytvořit ovladač, který zajišťuje vyčítání dat či výpočet teploty. Jak již bylo zmíněno, výpočet teploty není triviálním úkonem, a proto použijeme napsanou knihovnu od výrobce senzoru [25], která požaduje implementaci obsluhy periferie. Knihovna obsahuje strukturu, ve které jsou uloženy všechny potřebné parametry pro výpočet teploty ze senzoru. Velká část těchto parametrů se musí vyčíst z EEPROM senzoru a stačí to pouze při startu. Tyto parametry jsou nastavené z výroby např. zesílení nebo čísla vadných pixelů. Periodicky pak vyčítáme hodnoty z RAM, které obsahují výstup z ADC. Získáme ještě současnou hodnotu napájení ADC, okolní teplotu senzoru a poté se již vypočítá výsledná teplota (dokumentace k funkcím dostupná z [26]). Při výpočtu ještě dochází ke korekci emisivity povrchu senzoru, která je nastavena na 0,95, která se typicky uvádí u pneumatik [27]. Poté dochází k úpravě dat pro posílání přes RS485, kdy místo celého snímku se odesílá pouze řádek o šířce 32 pixelů. Lze taky přidat průměrování přes podélné pixely pro alespoň částečné potlačení probržděných míst na pneumatice.

Logika vyčítání je implementována pomocí stavového automatu, který obsahuje následující stavy:

- *WAITING FOR DATA* - Stav kdy v RAM senzoru ještě nejsou nové data a při tomto stavu musí běžet časovač, který vyvolá přerušení po uplynutí 3x menší doby než je nastavená obnovovací frekvence.
- *READ FLAG* - Uplynul čas, po který se čeká na přítomnost nových dat a vyčítáme stav registru určující přítomnost nových dat. Čtení je realizováno pomocí přerušení, ve kterém se nastaví proměnná určující přijetí nových dat (kvůli zrychlení rutiny přerušení).
- *CLEAR FLAG* - Nová data jsou přítomna v RAM, proto musíme nastavit bit v senzoru, že jsme data vyčetli. Zavolá se funkce na zápis na sběrnici v přerušení.
- *CLEAR FLAG CHECK* - Došlo k přepsání bitu v senzoru a teď se provede opětovné přečtení bitu pro ověření zápisu.
- *FRAME READ* - Dochází k vyčítání dat k pixelům opět v přerušení.
- *FRAME READ AUX* - Vyčítáme další data z RAM, potřebné k vypočtení teploty.
- *CALCULATE TEMP* - V tomto stavu se vypočítá teplota z přijatých dat a připraví se na posílání do hlavní desky.

Pro zrychlení obsluhy přerušení se pouze indikuje potřebná změna stavového automatu, který se kontroluje v hlavní nekonečné smyčce. Tento bit se mění ve funkci, která se provede při dokončení příjmu dat. Logika stavového automatu lze vidět na Obrázek 33.



Obrázek 33: Diagram stavového automatu vyčítání dat.

Požadovaná rychlost RS485 sběrnice je vázána na velikost paketu a s jakou frekvencí jej chceme přenášet a taktéž, kolik zařízení bude připojeno na sběrnici. Formát přenosu zvolíme tak, aby byl lidsky čitelný pro zjednodušení ověření funkčnosti např. pomocí převodníku na RS485 na USB. Teplota se posílá pomocí 3 digitů v dekadické soustavě. Tedy minimální rychlost pro 4 zařízení, 32 pixelů a rychlost vyčítání 1 Hz získáme nezbytnou minimální přenosovou rychlost bez kontrolních bitů a mezer $4 \times 32 \times 3 \times 8 = 3072 \text{ bit s}^{-1}$. Existuje doporučení, že sběrnice dokáže ještě s malým zpožděním přenést data, pokud je vytížení menší jak 70 % a tedy zvolená rychlost by měla být vyšší. Pro maximální frekvenci to pak vychází $98\,304 \text{ bit s}^{-1}$ a nastavená rychlost sběrnice je $125\,000 \text{ bit s}^{-1}$. V této aplikaci bychom mohli použít standardní rychlost $115\,200 \text{ bit s}^{-1}$, ale v této aplikaci to nedává smysl. Tyto rychlosti byly v minulosti stanoveny kvůli frekvencím krystalů tak, aby šla rychlost jednoduše vydělit. Interní RC oscilátor MCU má frekvenci 16 MHz a tedy jakákoliv "standardní" rychlost pouze způsobí chybu mezi zvolenou a nastavenou frekvencí, což nemusí tolik vadit, pokud to mají všechna zařízení na sběrnici stejně. Je možné mít určitou toleranci přenosové rychlosti, protože dochází k převzorkování a tím jde dosáhnout tolerance cca. 4 %

Podle [28] je typická přesnost interního oscilátoru $\pm 1\%$, pokud uvažujeme plný rozsah teploty $-40 - 105^\circ\text{C}$, získáme maximální hodnotu $\pm 3\%$. Tolerance USARTu



musí být vyšší než je chyba interního oscilátoru. Správným nastavením periferie můžeme získat toleranci až 4,375%^[29]. Odpovídající nastavení je 16x převzorkování, bit ONEBIT v registru CR3 na '1' (podle toho bitu nastavujeme, že zařízení pracuje v prostředí bez rušení) a bity registru BRR²[3:0] se rovnají nule. Pokud používáme 16x převzorkování, tak se $BRR=USARTDIV$ a v kombinaci 64 MHz a 125 kbit s⁻¹ je tento registr roven nule.

Budič RS485 obsahuje piny DE³, RE⁴. Při posílání dat musí být pin DE v logické '1' a při příjmu musí být pin RE v logické '0'. Piny jsou spojené a jsou řízeny jen jedním pinem. Pokud by bylo řízení pinů oddělené, můžeme detekovat kolizi na sběrnici, nicméně protokol sběrnice by měl být navržen tak, aby nedocházelo ke kolizím. Budiče jsou chráněny proti zkratu, takže v případě kolizi nedojde k destrukci zařízení.

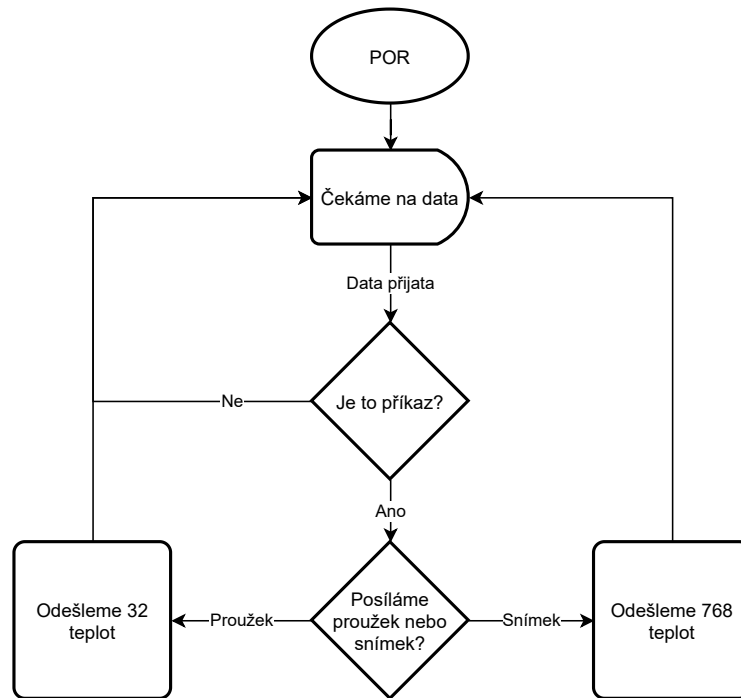
Na sběrnici bude celkem 5 zařízení a to čtyři senzory a deska, která řídí komunikace (rozmístění senzorů lze vidět na Obrázek 16). Jedná se o komunikaci single master/multiple slave a je nutné vytvořit protokol, při kterém bude vždy komunikovat pouze jedno zařízení a ostatní poslouchat. Pro kódování komunikace by v tomto případě bylo výhodně použít TLV⁵, kdy se v paketu posílá typ, velikost a data. Takové schéma pak velice jednoduše umožňuje ostatním zařízením poslouchat jen tehdy, když se posílají pro ně zajímavá data. Protokol je ponechám tak jednoduše (viz. Obrázek 34) jak to jde a znaky se posílají pomocí ASCII znaků. Teplota se tedy posílá v ASCII jako tříbitová dekadická čísla. Pro příkazy jsou vyhrazena písmena kdy písmeno 'a' znamená, že má senzor s označením 'a' poslat 32 teplot a znak 'b', pro druhý senzor a tak to logicky pokračuje dále. Pak je tu implementovaný ještě jeden příkaz, tím je 'x' a vyčte se tím celý snímek teplot prvního senzoru. Pro ostatní senzory jsou použité příkazy 'y', 'z' a 'w'. Data jsou ukončeny vždy znakem ';'.

²Baud Rate Registr

³Driver Enable

⁴Receiver Enable

⁵Type - Length - Value



Obrázek 34: Vývojový diagram protokolu RS485 z pohledu senzoru.

Jedna z nevýhod realizace, je že každý senzor musí mít vlastní příkaz a musí mít jedinečné ID. Tedy se musí kompilovat kód pro každý senzor samostatně. U interních senzorů je nastavení ID vyřešeno pomocí různě osazených odporů.

4.2 Interní měření

Všechny vybrané senzory mají autodetekci komunikační frekvence a zvládnou komunikovat po několika standardních frekvencích I2C. Použitelné frekvence jsou 100 kHz, 400 kHz a 1 MHz. Základní adresy senzorů z výroby jsou 0x60 pro tlakový senzor, 0x33 pro senzor teploty a 0x44 pro senzor vlhkosti.

Standard BLE umožňuje posílat data ze senzoru pomocí dvou metod. Jedna za možností je, že všechny senzory budou pouze inzerenti a data budou posílat právě v inzerci a hlavní zařízení se bude chovat jako vyhledávač a pouze poslouchat inzerci. Druhá varianta je vytvoření spojení mezi zařízeními. K dispozici tedy máme primární inzerci o velikosti až 31 bajtů a sekundární inzerci až 255 bajtů. Data, které potřebujeme odeslat, jsou:

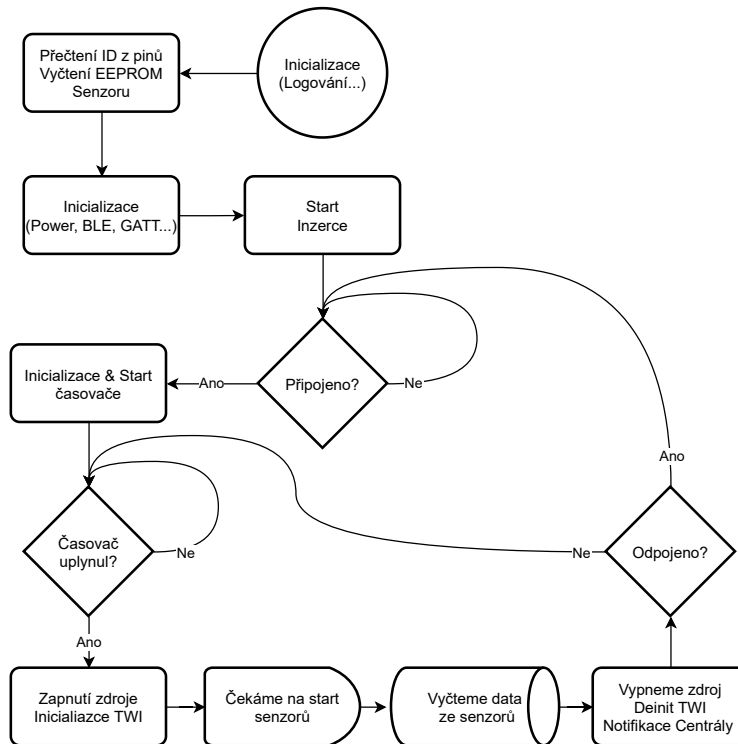
- Teplota - 16 hodnot teploty vnitřku pneumatiky a každá teplota má 10 bitů
- Tlak - Interní tlak má 16 bitů
- Vlhkost - Relativní vlhkost v procentech stačí 8 bitů
- Pozice - Pozice senzoru na autě (2 bity)

Celkový počet potřebných bajtů k přenosu všech informací je 24 bajtů, což by se mohlo vejít do primární inzerce. Nicméně primární inzerci obsahuje zejména různé důležité informace potřebné pro připojení, takže 31 bajtů není hodnota, se kterou bychom mohli pracovat. Vhodné je použití pouze sekundární inzerce pro přenos dat.

Při inzerci ale nemáme garanci, že data dorazila a že dorazila v pořádku, proto bylo zvoleno pro přenos dat "připojení".

Pro vývoj na tomto zařízení je nutné použít sadu pro vývoj softwaru *nRF5 SDK*, který obsahuje řadiče a knihovny pro obsluhu všech periférií a mnoho příkladů, jak je použít. Součástí SDK je také tzv. *SoftDevice* a jedná se o bezdrátový zásobník ve formě předkompilovaného binárního souboru, který se musí nahrát do MCU společně s naším binárním souborem pokud chceme využívat bezdrátový modul. Jeden z velkých nedostatků je, že pokud je přítomný *SoftDevice* v zařízení, tak kód lze ladit ve velmi omezené míře a to je prakticky vždy, když chceme pracovat s BLE. Lze použít pin SWO jako USART po kterém můžeme směřovat kontrolní výpisy.

Při vývoji vycházíme z příkladu *ble_peripheral/Blinky*, který je zejména napsaný pro nativní vývojový kit. Z původního kódu zde zanecháme pouze části, které inicializují služby a všechny další nezbytné části. Předtím než se začne posílat inzerce, musíme zjistit, o jaký senzor se jedná, protože název zařízení obsahuje identifikační číslo. Toto číslo získáme přečtením logických hodnot na dvou pinech, které jsou různě osazeny tak, aby měly vždy unikátní kombinaci. Název zařízení je zvolen jako *eForceTMP500*, kdy poslední dvě čísla mohou nabývat pouze hodnot '1' a '0' a indikují, jestli je odpor na pinu 4 a 5 opřený o zem nebo o napájecí napětí. Poté se vyčtou z EEPROM IR senzoru hodnoty nutné pro výpočet teploty. V dalších částech kódu inicializujeme nezbytné části jako řízení spotřeby, BLE zásobník nebo GATT. Celá logika kódu je zobrazena na vývojovém diagramu Obrázek 35.



Obrázek 35: Vývojový diagram kódu BLE periferie.

Při vytváření vlastní BLE obsluhy musíme zadat UUID které lze zvolit jako 16-bitová nebo 128-bitová verze. Obecně zkrácené verze UUID mají svoje definice (definované standardizační organizací SIG). Existují 16 bitové UUID pro výrobce zařízení, kdy každé zařízení má unikátní číslo, které nemůžeme použít. Proto použijeme

náhodně vygenerované 128 bitové základní UUID. Pro charakteristiky můžeme použít zkrácené verze a to *0x2A6E* která označuje teplotu a *0x2A6D* tlak. Oběma charakteristikám nastavíme možnost čtení a notifikace a zakážeme zápis. Dále nastavíme velikost, která je pro tlak 16 bitů a pro teplotu 16x8 bitů. Protože je přidáno UUID je třeba aplikaci posunout o 4B dál kvůli uložení vlastního UUID.

Vyčítání ze sensorů je realizováno časovačem. Časovač musí být použitý jiný než `TIMER0`, protože ten je již využitý pro `SoftDevice`, který má následující nastavení Kód 1.

```
1 timer_cfg.bit_width=NRF_TIMER_BIT_WIDTH_24;
2 timer_cfg.frequency=NRF_TIMER_FREQ_250kHz;
3 timer_cfg.interrupt_priority=5;
4 timer_cfg.mode=NRF_TIMER_MODE_TIMER;
```

Kód 1: Nastavení časovače.

Priorita je zvolena 5 protože předchozí priority jsou již obsazeny `SoftDevice` programem.

Pokud je nastavená frekvence časovače menší než 1 MHz, nepoužijí se 16 MHz hodiny a tím se sníží i odběr [30]. Bitová šířka nastavená na 24 bitů znamená, že můžeme čítat do 2^{24} . Nastavení hodnota čítání je do 1 200 000, což odpovídá 4,8 s.

Po vypršení časovače zapneme napájení sensorům a inicializujeme I2C. Pro tlakový sensor musíme počkat pouze 2 ms než začne posílat validní data. Toto čekání lze udělat pomocí časovače nebo příkazu `nrf_delay_ms`, který znemožní MCU přejít do úsporného režimu v této práci je tento příkaz použit. Teplotní sensor začne posílat validní data až po 80 ms a plus další dvě obnovovací frekvence, nastavené na senzoru. Sensor má při koupi nastavenou obnovovací frekvenci 4 Hz a tedy bychom první data dostali až za dalších 500 ms. Tedy do EEPROM senzoru je zapsána obnovovací frekvence 64 Hz. Celkově je nutný čas 110 ms. Při testování se ukázalo, že tento čas nestačí a sensor se nestihne tepelně ustálit a vrací chybná data. Empiricky jsme našli čas, který je dostatečný k teplotnímu ustálení, kdy sensor již posílá validní data a je to 200 ms (celkem tedy 280 ms). Vyčtením teploty získáme celý snímek, ale posílá se pouze proužek teplot a to pouze 6 řádek, který je uprostřed snímku a směřuje kolmo na povrch. Ostatní řádky směřují na povrch pod úhlem a jsou pod vlivem větší chyby. Teplota je vypočtena s desetinou čárkou, kterou neposíláme a teplota je třeba zaokrouhlit pomocí funkce `round()`.

Pro vyčtení ze IR senzoru byla opět použita knihovna výrobce, která byla upravena [17]. Knihovna ve výpočtech používá často datový typ `float` a také typ `double`. Použitý mikrokontrolér je z řady ARM Cortex M4 s vlastní FPU která používá `float`. V případě datového typu `double` dojde k jeho emulování [31]. V případě nutnosti lze zvýšit rychlost výpočtu a knihovnu přepsat do datového typu `float`.

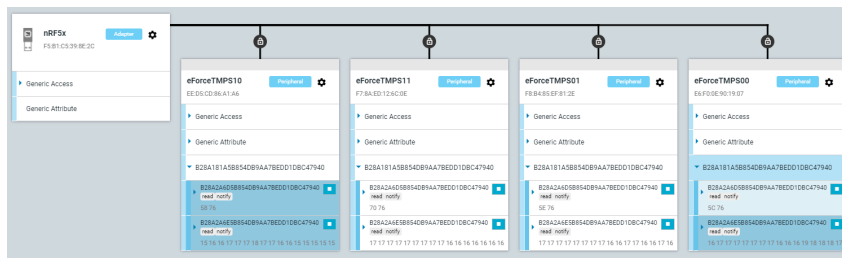
Při ověření spotřeby byla minimální hodnota vždy okolo 440 μ A. Jedná se o chybu v IO kdy při použití GPIO a I2C (na tomto MCU je nazýváno jako TWI) knihoven zůstane zapnutý výstupní buffer a není možné dostat se pod oněch 440 μ A [32]. Odběr se nesníží ani vypnutím ani deinicializací periferie. Řešením je deinicializovat periferii a poté zapsat do registrů viz Kód 2. Výrobce v dokumentaci nespécifikuje co tyto registry znamenají.

```
1 *(volatile uint32_t *)0x40003FFC = 0;
2 *(volatile uint32_t *)0x40003FFC;
3 *(volatile uint32_t *)0x40003FFC = 1;
```

Kód 2: Řešení fantomového odběru.

Nastavená síla signálu byla 0 dBm, která podle standardu by měla dosahovat komunikační vzdálenosti 1 m. Z testování (5.2: Testování) bohužel vyplynulo, že vysílací výkon není dostatečný a proto byl zvýšen na 4 dBm, čímž se zlepšila spolehlivost spojení.

Pro ověření funkce může posloužit Android aplikace *nRF Connect* či USB rozhraní NRF52840-DONGLE. K USB rozhraní je program *nRF Connect for Desktop*, který dokáže zobrazit RSSI na každém kanálu BLE, zařízení v okolí či nástroj pro nahrávání firmwaru. S tímto rozhraním se lze připojit k několika zařízením současně a vyčítat data Obrázek 36.



Obrázek 36: Program *nRF Connect for Desktop* připojen ke všem čtyřem senzorům.

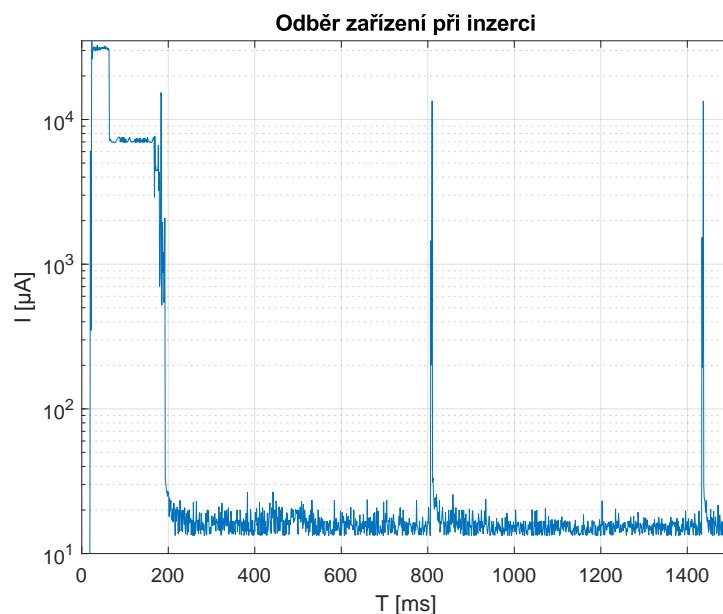
Pro měření spotřeby můžeme použít vývojovou desku od STM *Power Consumption Measurement*. Zařízení zvládne měnit napětí na výstupu od 1,8 V do 3,3 V a měřit proud od 180 nA do 50 mA. Šířka pásma proudu je až 100 kHz. Zařízení lze ovládat pomocí displeje ale mnohem užitečnější je možnost připojení do PC. K připojení se používá SW *STM32 Cube Monitor - Power* který dokáže zaznamenat skoro libovolnou délku záznamu. Hodnoty odběru pak ukazuje přímo v grafu. Záznam lze vyexportovat a získat data ve formátu csv.



Obrázek 37: STM32 Power Consumption Measurement.

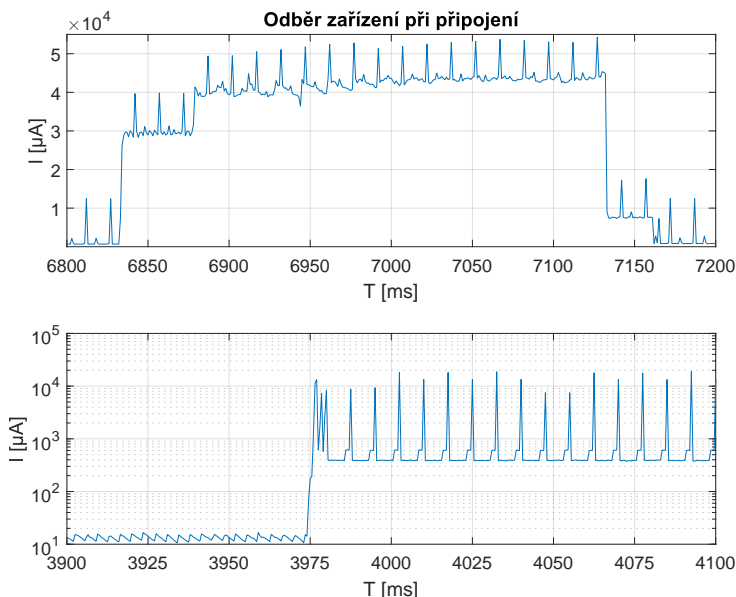
V grafu Obrázek 38 můžeme vidět odběr optimalizovaného kódu pro minimální odběr při inzerci. První graf zobrazuje odběr v celém měřítku, kde do 200 ms je vidět zapnutí MCU, při kterém dochází k vyčtení dat z EEPROM senzoru. V klidovém

stavu MCU odebírá okolo $15\ \mu\text{A}$ a při samotné inzerci $13,5\ \text{mA}$. Průměrná hodnota odběru tedy je $40\ \mu\text{A}$ a zařízení bude fungovat (z baterie CR2032) 5 500 hodin při kapacitě $200\ \text{mAh}$ v tomto režimu (což je asi 230 dní).



Obrázek 38: Odběr zařízení při inzerci.

V grafu Obrázek 39 lze vidět odběr při připojení zařízení. První z grafů je odběr při vyčítání dat ze sensorů a druhý ukazuje změnu odběru při připojení k zařízení. Při připojení se klidový odběr zvedne na $400\ \mu\text{A}$ a jasně vidíme, jak se liší připojení od inzerce. Opět při vysílání se zvedne odběr na $13,5\ \text{mA}$ při zapnutí zdroje se odběr zvedne až na $40\ \text{mA}$. Zdroj se zapne na pouhých $333\ \text{ms}$ s průměrným odběrem $37,6\ \text{mA}$, a pak dalších $4752\ \text{ms}$ je odběr $1,29\ \text{mA}$. Celkový průměrný odběr je $3,67\ \text{mA}$ a tedy zařízení může z baterie měřit až 60 hodin.



Obrázek 39: Odběr zařízení při připojení.

Jelikož v této aplikaci je každý gram důležitý proto by bylo možné použít menší baterii za cenu kratší životnosti zařízení. Životnost závodních pneumatik není příliš vysoká, a tedy je životnost zařízení dostačující. Normálně by tento typ zařízení měl vydržet okolo 1 - 5 let.

4.3 Hlavní Deska

Na desce se nacházejí dva mikrokontroléry, a proto je tato podsekcce rozdělena na další dvě části, a to periferní část s mikrokontrolérem STM32 a bezdrátovou BL652.

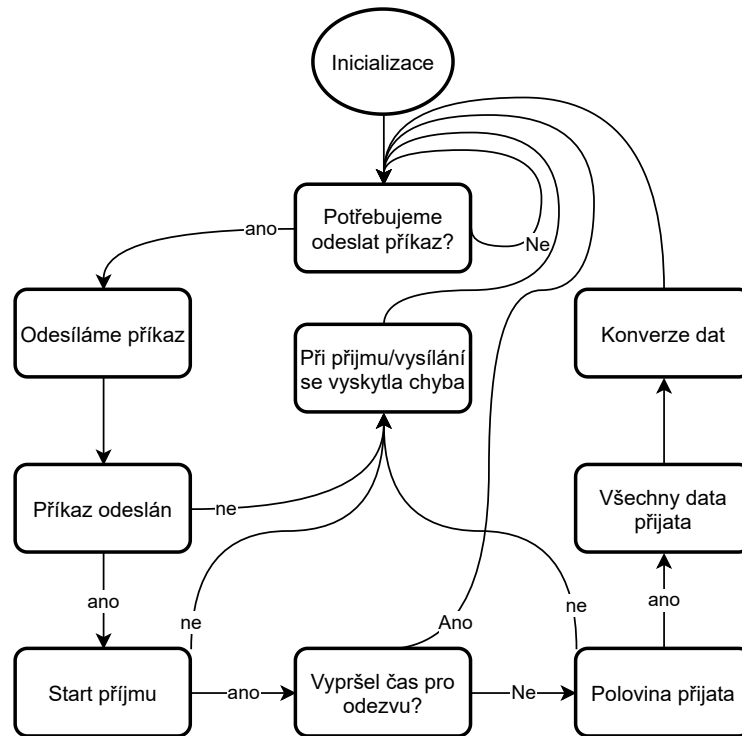
4.3.1 STM32

Při vývoji aplikace platformy mikrokontroléru platformy STM32 je použita opět knihovna HAL stejně jako u externích sensorových desek.

Pro komunikaci po sběrnici RS485 používáme UART v přerušení, protože při použití blokovacího režimu by MCU nedokázalo dostatečně rychle zpracovávat příchozí data a mohlo by docházet ke ztrátě dat. Základní myšlenka vyčítání dat ze sensorů je že se periodicky posílají příkazy pro vyčtení. Periodičnost lze realizovat pomocí časovače anebo si ukládat aktuální čas od startu MCU s přičtenou periodou posílání (v případě HAL knihoven `HAL_GetTick()`). V hlavní smyčce se kontroluje, jestli je čas větší než uložený.

Logika vyčítání je naznačena v následujícím obrázku viz Obrázek 40. Po inicializaci periférií se zavolá funkce `TTsendCommand`, která pošle příkaz 'a'. Funkce `TTsendCommand` zajišťuje iterování příkazů pro všechny senzory a nakonec zavolá příkaz `HAL_UART_Transmit_IT` který zajistí odeslání příkazu na sběrnici. Po odeslání příkazu se vyvolá přerušení, ve kterém se nastaví časový limit pro odezvu na příkaz a zavolá se `HAL_UART_Receive_IT`. Při přijmutí poloviny dat se opět vyvolá přerušení a zastaví se časový limit pro odezvu senzoru. Když dojde k vypršení času

pro odpověď (senzor pravděpodobně není připojen) tak se pošle příkaz pro další senzor. Nakonec přijde další přerušení při dokončení příjmu dat ze senzoru a data se musí překonvertovat, aby šla odeslat na CAN, a to se provede mimo obsluhu přerušení. V přerušení se tedy pouze nastaví proměnná, která indikuje přítomnost nových dat potřebných ke konverzi. V hlavní smyčce se zjistí, že jsou data připravena a z pole znaků přetypují na *uint8* tak, aby se jednalo o teplotu. Data se rovnou připraví pro odeslání na CAN (použije se konkrétní měřítko a posun) a v příštím rámci jsou nová data.



Obrázek 40: Vývojový diagram protokolu RS485 z pohledu hlavní desky.

Obsluha přerušení je napsána tak, aby zde zbytečně nedocházelo k výpočtům, které jej můžou zpomalit. Pokud by byla obsluha delší, tak by mohlo dojít k chybě *Overrun*. To bohužel znamená že jsme nestihli přijmout všechna data a nemáme je kompletní. Chyba se vynuluje a pošle se další příkaz. Při testování k této chybě nedocházelo (ani k ostatním), takže příjem dat je dostatečně kvalitní.

Pro komunikaci mezi BL652 a STM je použitý UART, kdy STM pouze čeká na nová data. Data, o velikost 20 B, se posílají v paketu, který obsahuje adresu senzoru tlak, šestnáct teplot a výhledově relativní vlhkost. Pro příjem je použito DMA a obsahuje pouze dva stavy. Jeden ze stavů je, čekání na data a druhý je že jsou k dispozici nová data. Aby obsluha přerušení byla co nejkratší v přerušení, *HAL_UART_RxCpltCallback* se pouze změní aktuální stav. V hlavní smyčce se poté zavolají příkazy pro přenos dat do CANových zpráv.

Na desce se nachází senzor tlaku, který měří atmosférický tlak, který je potřebný pro výpočet tlaku v pneumatice. Je to identický senzor jako na interní desce, a proto je komunikace se senzorem identická. Hodnota tlaku se vždy vyčte při startu zařízení - předpoklad je, že se atmosférický tlak nebude měnit tak dramaticky, aby bylo potřeba jej vyčítat častěji.

Nastavení registrů CAN sběrnice se provede pomocí registru BTR⁶. Na CAN sběrnici trvá poslat jeden bit jednu nominální bitovou délku. Tato bitová délka se rozdělí na několik segmentů: synchronizační, propagační, první etapa a druhá etapa[33]. Pro 1 Mbit s^{-1} je nastavení následující (při frekvenci hodin 48 MHz):

- Předdělička - 4
- Etapa 1 - 10
- Etapa 2 - 1

Nastavení lze zjistit z webové stránky [34], která rovnou zobrazuje i nastavení registrů. Velmi důležité je nastavení bitu *Automatic Bus-Off Management* protože při překročení hodnoty 255 v TEC⁷ dojde k vypnutí sběrnice. Přestanou se posílat zprávy dokud nedojde k znovu zapnutí pomocí firmwaru. Je tedy vhodné nastavit bit ABOM do '1' a reset bude obstarávat HW. Při testování v ideálních podmínkách nedojde k přetečení tohoto registru ale prakticky k ní může dojít. Současná generace elektrické formule nemá chyby přenosu kvůli několika striktním pravidlům při návrhu HW ale i kabeláže. To nemusí platit o minulé či budoucí generaci.

Odesílání dat na CAN je realizováno pomocí knihoven, které jsou generovány pomocí nástroje CANdb, který je aktivně vyvíjen týmem eForce. Jedná se o grafické rozhraní vytvořené k databázi obsahující definice zpráv. Vygenerovaná knihovna obsahuje struktury k jednotlivým zprávám a pomocí makra jsou vytvořené konstanty jako offset a faktor. Součástí jsou také funkce, které posílají zprávy na CAN, přijímají a dekódují. Pro použití musíme implementovat inicializaci a funkce zodpovědné za přijetí/odeslání zprávy. Odesílání je realizováno v hlavní nekonečné smyčce.

Standardní CAN rámec obsahuje 8 bajtů dat. Pro každé kolo je definována zpráva podle Tabulka 7 ve které je obsažen multiplexor který určuje sadu teplot. V jedné zprávě pošleme celkem 6 teplot, abychom poslali všech 32 tak musí být posláno celkem 6 zpráv (tedy 6 sad). Teploty se posílají jako 10 bitové s faktorem $0,25 \text{ }^\circ\text{C}$ a tedy maximální teplota je $255 \text{ }^\circ\text{C}$. Současný protokol RS485 nepodporuje posílání hodnot za desetinou čárkou, ale CAN rámec je již na to připraven. Rychlost posílání zpráv je nastavena na 5 ms.

Tabulka 7: Rozložení signálů externích teplot v CAN zprávě.

	0	1	2	3	4	5	6	7
byte 0	MUX			reserved	Temp[0]0:3			
byte 1	Temp[0]4:9					Temp[1]0:1		
byte 2	Temp[1]2:9							
byte 3	Temp[2]0:7							
byte 4	Temp[2]8:9		Temp[3]0:5					
byte 5	Temp[3]6:9				Temp[4]0:3			
byte 6	Temp[4]4:9					Temp[5]0:1		
byte 7	Temp[5]2:9							

Pro posílání teplot všech pneumatik potřebujeme celkem 4 sady po 6, které mají stejné rozložení.

⁶Bit Timing Register

⁷Transmit Error Counter

Pro posílání interních teplot pneumatik použijeme pouze jednu zprávu Tabulka 8, ve které se nachází multiplexor, který určuje jestli se posílá horních 6 teplot nebo spodních 6 teplot. Další důležitý signál je *Position*, který označuje umístění pneumatiky. Jako v případě externích teplot by mohlo být výhodné mít 4 zprávy ale vzhledem k frekvenci posílání (0,25 Hz) se tento přístup nevyplatí. Definice signálu teploty je identická jako v případě externích teplot.

Tabulka 8: Rozložení signálů interních teplot.

	0	1	2	3	4	5	6	7
byte 0	Position		MUX		Temp[0]0:3			
byte 1	Temp[0]4:9						Temp[1]0:1	
byte 2	Temp[1]2:9							
byte 3	Temp[2]0:7							
byte 4	Temp[2]8:9			Temp[3]0:5				
byte 5	Temp[3]6:9				Temp[4]0:3			
byte 6	Temp[4]4:9						Temp[5]0:1	
byte 7	Temp[5]2:9							

V případě tlaku posíláme původní 16 bitové hodnoty, které jsme vyčetli ze senzoru. Nicméně vzhledem k tomu, jak je výpočet jednoduchý, tak je možnost přidat signálu faktor a offset a rovnou mít hodnoty signálu v kPa.

$$P = \frac{P_{raw}}{P_{factor}} + P_{offset} \quad (13)$$

Nastavení by tedy bylo následující: $P_{factor} = \frac{1}{14}$, $P_{offset} = -\frac{28990}{14}$. Datový typ by bylo možné dále optimalizovat, ale není k tomu důvod vzhledem k tomu, že novou zprávu musíme vytvořit a taktéž se do CANového rámce vejde. Výsledné rozložení zprávy lze vidět na Tabulka 9.

Tabulka 9: Rozložení signálů tlaků pneumatik.

	0	1	2	3	4	5	6	7
byte 0	TirePressure_FR 0:7							
byte 1	TirePressure_FR 8:15							
byte 2	TirePressure_FL 0:7							
byte 3	TirePressure_FL 8:15							
byte 4	TirePressure_RR 0:7							
byte 5	TirePressure_RR 8:15							
byte 6	TirePressure_RL 0:7							
byte 7	TirePressure_RL 8:15							

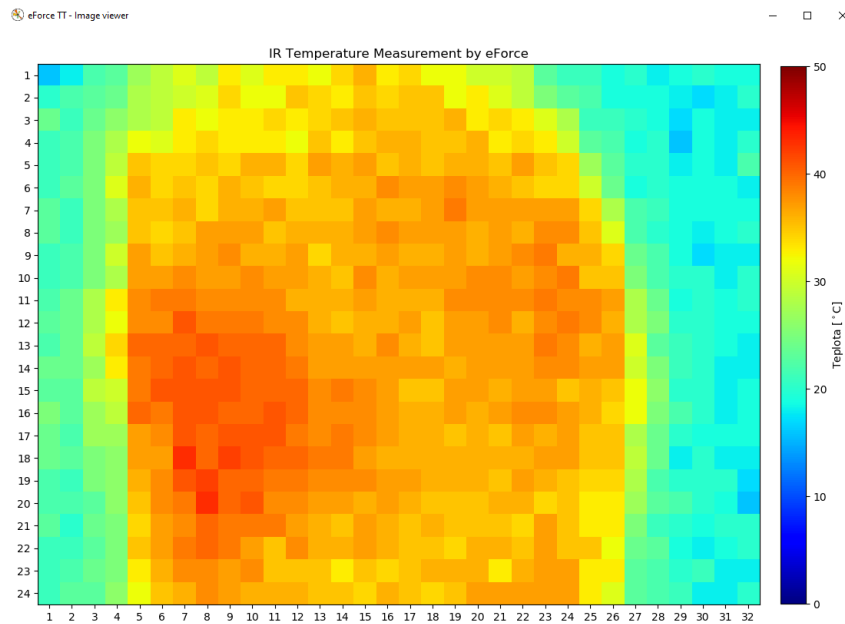
4.3.2 BL652

Druhý procesor na desce se v topologii BLE bude chovat jako centrální zařízení. Projekt vychází z příkladu od výrobce a to *ble_app_blinky_c*, který se dokáže připojit k zařízení které má v sobě projekt *ble_app_blinky*. Aby mohlo zařízení fungovat jako centrála, musí mít v sobě nahraný SoftDevice S132, který na rozdíl od s113 má více funkcí.

5 Testování

5.1 Testování funkčnosti

Pro ověření funkce externích senzorů a ověření toho kam senzory vlastně směřují, byl vyvinut kód Obrázek 41 v jazyce Python. Tento kód se připojí k USB převodníku, který je připojen k jednomu senzoru. Senzor je periodicky posílán příkaz pro vyčtení všech teplot a obraz se automaticky aktualizuje. Zároveň je teplota číselně vypisována do příkazové řádky, protože z barev jen těžko vyčteme přesnou teplotu.



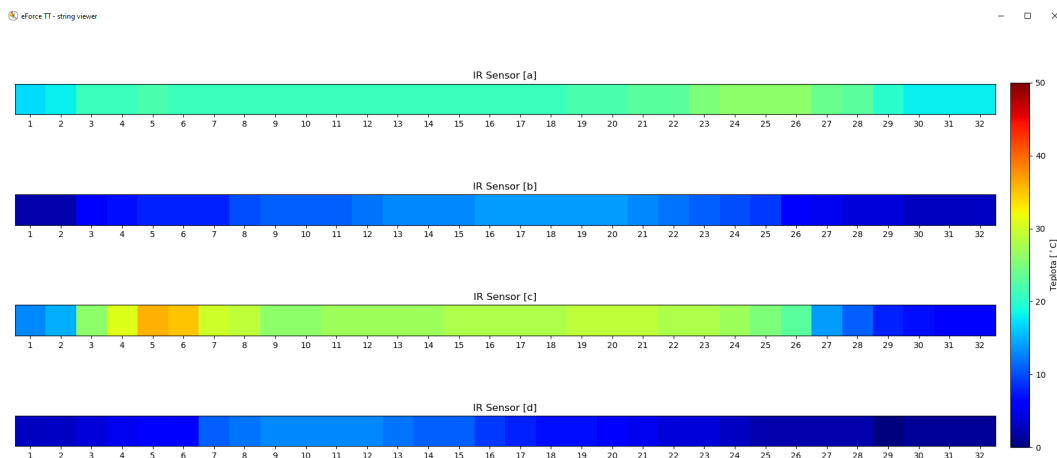
Obrázek 41: Grafické rozhraní pro zobrazení celého snímku.

Před testováním je ještě ověřeno Obrázek 42, že teplota, které je zobrazena senzorem, odpovídá realitě. Teplota je změřena kontaktním senzorem teploty. Mezi teplotou nebyl rozdíl, což znamená, že nastavená emisivita je korektní.



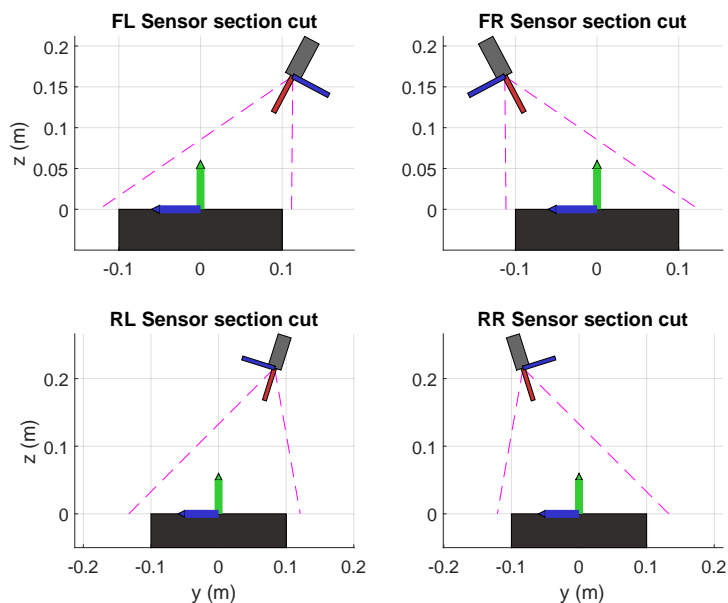
Obrázek 42: Zobrazení celého snímku namontovaného senzoru.

Pro zobrazení pouze proužku teplot byl vyvinut další kód, který se postupně připojí k sensorům a zobrazí pouze proužek teploty. Grafické rozhraní je vidět na Obrázek 43, ale bohužel nebylo připojeno k žádnému senzoru.



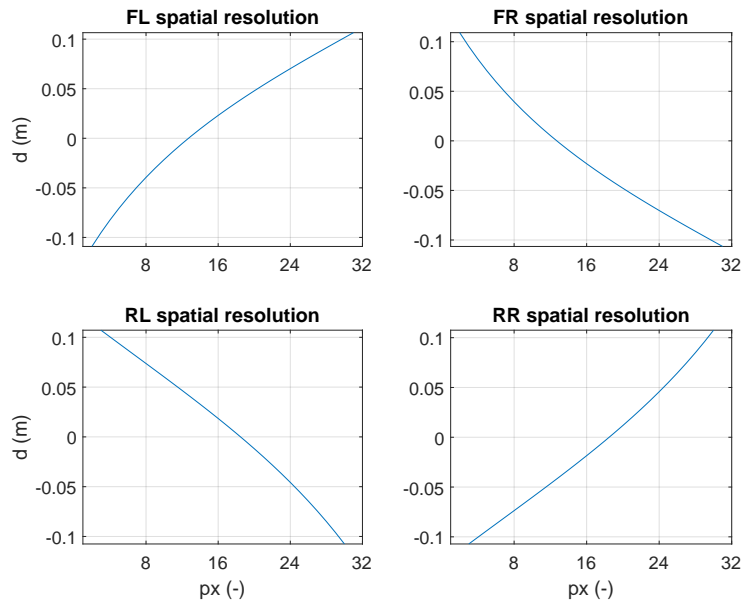
Obrázek 43: Grafické zobrazení proužku teplot.

Senzor na pneumatiku směřuje pod úhlem a z rozdílných vzdáleností, a proto musí dojít ke korekci pixelů. Následující obrázek Obrázek 44 zobrazuje pozici sensorů vůči pneumatice.



Obrázek 44: Umístění sensorů vůči pneumatice.

Z toho získáme korekční funkci pro každý senzor Obrázek 45. Výsledné grafy tedy pak zobrazují přepočtené pixelu na umístění.



Obrázek 45: Úhlová korekce externích senzorů.

I pro interní senzory teploty došlo k ověření emisivity. Celý snímek se z interních senzorů posílal po UARTu který je zapnutý jen při testování (kvůli odběru). Změření bylo identické jako u externích senzorů.

5.2 Testování

Testování bylo zaměřeno na chování podvozku při ustáleném stavu v zatáčce. Tedy pilot měl za úkol jezdit v pravotočivé zatáčce a dostat se na maximální rychlost, při které auto ještě není ve smyku. Ideální jízda je bez korekcí volantu. Hlavní důvodem je ustálení teplot na pneumatice a zjištění, v jakém místě se pneumatika nejvíce zahřívá. Z tohoto měření dokážeme získat nastavení podvozku a tlaků pneumatik na disciplínu skidpad.

Při testování se bude měnit tlak a odklon, nicméně při různém poloměru zatáčení se mohou pneumatiky zatěžovat různě, a proto by bylo dobré jezdit různé poloměry. V testovacím areálu je místo pouze na 14 m kolečko v průměru a tedy se jezdil jen tento průměr. Menší průměr nebyl již možný, protože pilot nedokázal udržet vozidlo ve statickém režimu.

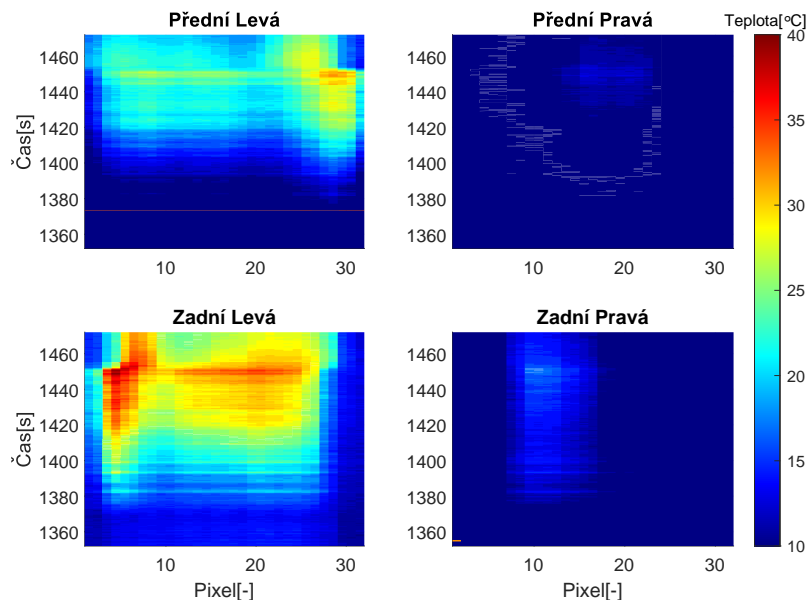
Podvozek je navržen tak, že v neutrální poloze jde odklon nastavit na obě strany. Změna zde probíhá pomocí přidání podložek, které lze mít vyrobené např. po 1 mm.

Seznam obsahuje všechny variace, které proběhly při testování. Teplota vozovky při testování byla $4,5^{\circ}\text{C}$

- Tlak[bar]: 1; 0,75 ; 0,5
- Odklony: neutrální, +4 mm, -4 mm
- Poloměr kolečka: 7 m

Teploty všech pneumatik lze vidět na Obrázek 46, který obsahuje časový úsek od začátku jízdy až po konec jízdy a navíc čas k vychladnutí. Zobrazené teploty jsou ještě před korekcí směřování úhlu a jsou při nastavení neutrálních odklonů a tlaku 0,5bar. Z výsledků je jasné, že teploty vnitřních pneumatik se dramaticky nemění,

tedy v dalších grafech budeme uvažovat pouze vnější pneumatiky. Teplota se nemění, protože vnitřní pneumatiky nemají tak velké F_z kvůli přenosu hmotnosti v zatáčce. Při testování nedocházelo ke změně odklonů na vnitřní straně auta, protože testování by se tím významně prodloužilo. Na datech Obrázek 46 lze také pozorovat deformaci pneumatik, kdy při zastavení se vrátí zpět do původní polohy.

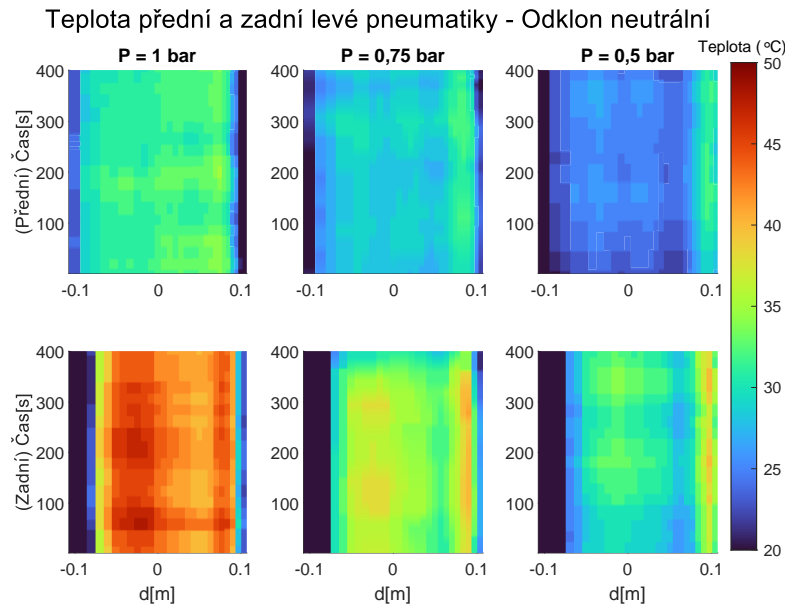


Obrázek 46: Teplota všech kol před korekcí.

Při testování se ukázalo, že interní senzory nemají dostatečný signál (původní nastavení síly signálu 0 dBm) a nedokáží spolehlivě komunikovat s hlavní deskou. Data se vyčítala ručně při zastavení vozidla, bohužel fungovaly spolehlivě senzory na vnitřní straně vozidla. Měření tlaku a teploty uvnitř pneumatiky bylo vzorkováno vždy mezi jízdami. Na konci testování se podařilo vyčíst data i ze sensorů na vnější straně vozidla. Následná analýza problému ukázala, že když je vozidlo vypnuté, dosah je dostačující ale při zapnutí výkonové elektroniky se příjem dost zhorší. Jediná varianta kdy, je možné číst ze všech sensorů zároveň je když má anténa výhled na kola bez překážek.

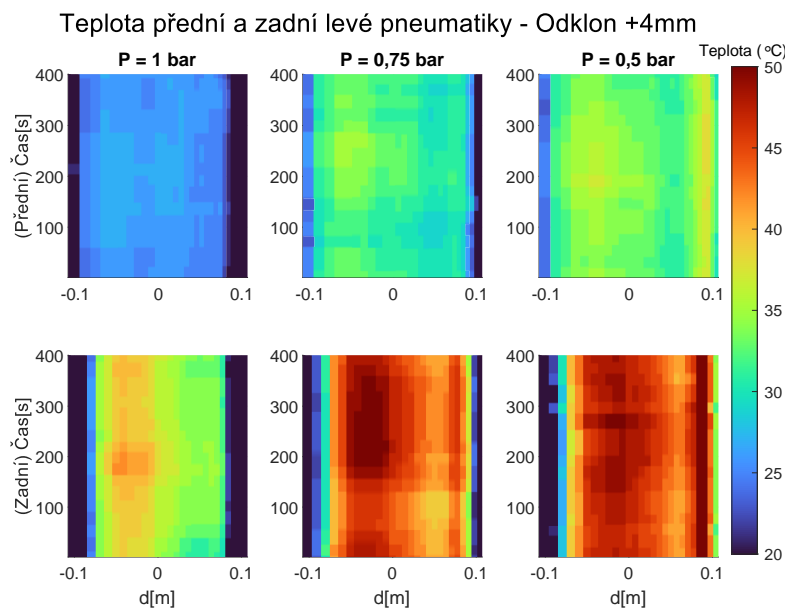
5.3 Výsledky testování

Následující grafy ukazují pouze časový úsek (kdy došlo ke stabilizaci teplot) a odhadem odpovídají jednomu kolečku. Se snižováním tlaku v pneumatice dochází Obrázek 47 k její větší deformaci a postupně se rozšiřuje plocha styku. Teplota se s nižším tlakem snižuje, protože je pneumatika více prohnutá dovnitř a zahřívá se právě na vnitřním kraji.



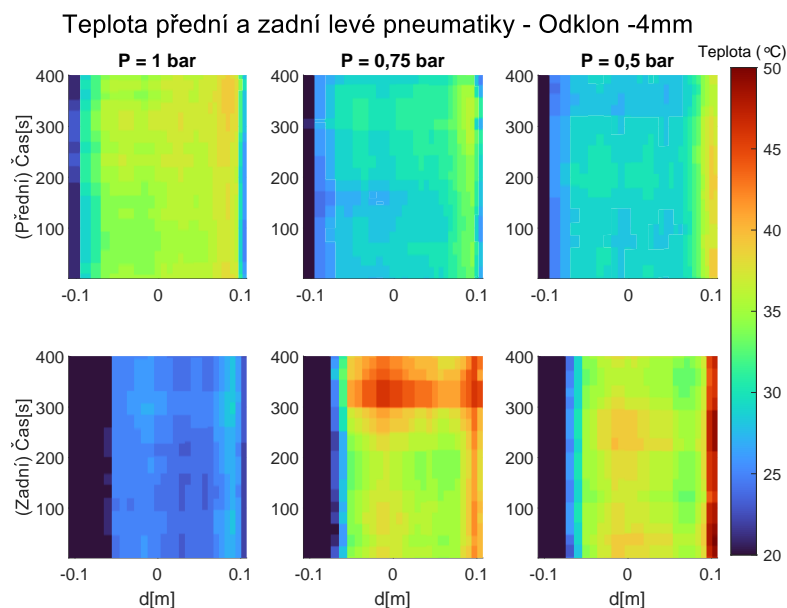
Obrázek 47: Teplota levých pneumatik při neutrálním odklonu.

Přidáním 4 mm dochází k nastavení pozitivního odklonu Obrázek 48 a při snižování tlaku v pneumatice dochází k zvyšování teploty, což je naprosto opačné chování než v případě neutrálního nastavení Obrázek 47.



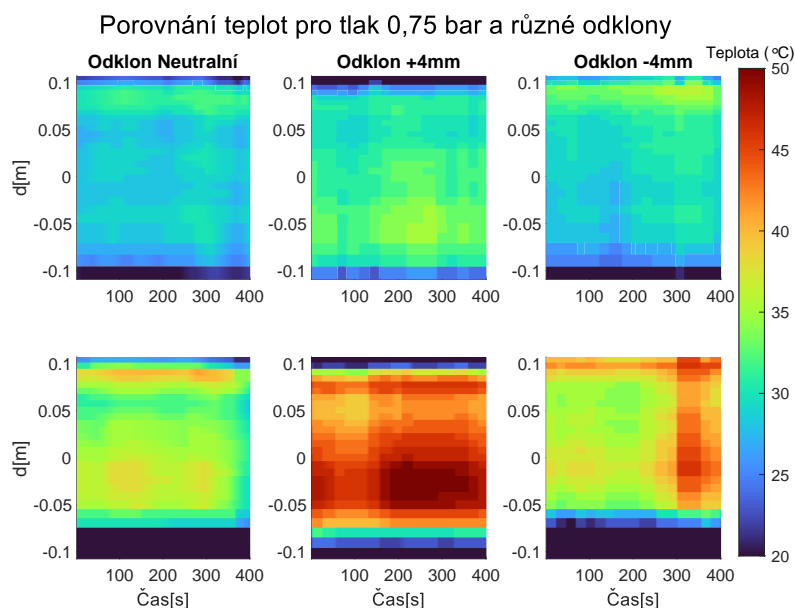
Obrázek 48: Teplota levých pneumatik při odklonu +4mm.

Při nastaveném odklonu -4 mm (negativní odklon) a tlaku 1 bar Obrázek 49 došlo k rozdílnému nastavení algoritmu rozdělující moment na kola. Moment se nerozděloval na základě zatočení volantu. Teploty se v tomto nastavení velmi liší od ostatních testů. I když je tato část méně použitelná, můžeme říci, že aktuální nastavení algoritmu je velice dobré. Nicméně v budoucích testováních bude potřeba přidat rozdílná nastavení algoritmu.



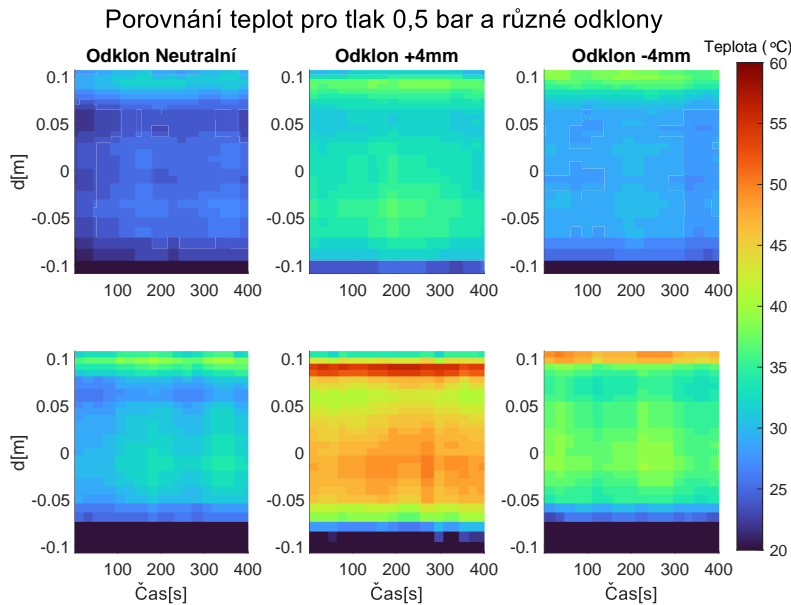
Obrázek 49: Teplota levých pneumatik při odklonu -4 mm.

Z porovnání odklonů při stejném tlaku můžeme jednoduše estimovat, který odklon zvětšil stykovou plochu. Největší plocha Obrázek 50 lze vidět při odklonu +4 mm (negativní odklon) a naopak nejmenší při odklonu -4mm (pozitivní odklon). Při pozitivním odklonu dochází k velké deformaci krajů pneumatiky, která se deformuje směrem pod vozidlo a tím se snižuje styková plocha.



Obrázek 50: Porovnání teplota levých pneumatik při tlaku 0,75 bar.

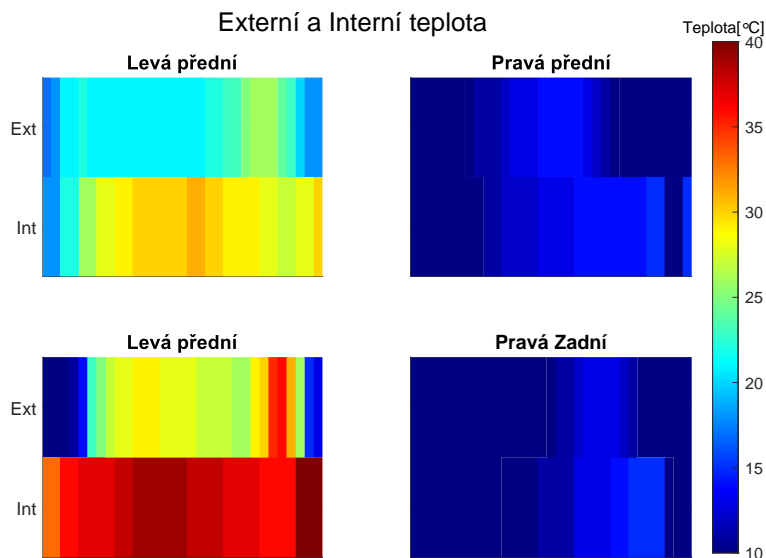
I při nižším tlaku Obrázek 51 vidíme velice dobře obdobné chování jako při tlaku 0,75 bar Obrázek 50. Při nižším tlaku opět dochází k větší deformaci boku pneumatiky a vyšším zatížení pouze malé části pneumatiky. Tento jev se může velmi negativně projevit na životnosti, kdy bok může být mnohem více opotřebován než zbytek pneumatiky.



Obrázek 51: Porovnání teplota levých pneumatik při tlaku 0,5 bar.

Z obou grafů (Obrázek 51, Obrázek 50) vyplývá, že vhodné nastavení podvozku směřuje k negativnímu odklonu pneumatiky a tlaku okolo 0,75 bar. Toto nastavení zatěžuje pneumatiku rovnoměrně a zbytečně ji nepřetěžuje.

Všechny interní teploty se podařilo nasbírat až po poslední jízdě a to v následujícím grafu Obrázek 52 se nachází porovnání teplot interních senzorů s externími. Teplotní rozdíl dosahuje i 10 °C.



Obrázek 52: Porovnání externí a interní teploty.

Na konci testování při nastaveném tlaku 0,5 bar byl konečný tlak následující (po odečtení atmosférického tlaku): 55 kPa (levá přední), 56 kPa (levá zadní), 54 kPa (pravá zadní), 53 kPa (pravá přední). Opět si lze všimnout vyššího tlaku na levých pneumatikách, ale celkově vzrostl tlak. Nedá se říct, že příliš dramaticky. Zajímavější



data bychom získali z disciplín, které se jedou po delší trati a vzduch v pneumatice má více času na ohřátí.



6 Závěr

V této práci se podařilo navrhnout, realizovat a otestovat měřicí systém pro měření teplot a tlaku pneumatik. Oproti zadání pro účely měření stačí menší rozsah tlaku 0,5 - 3 bar (relativní). Teplotní rozsah se zdá být dostačující.

Měřením teploty dokážeme najít nastavení podvozku, kde se zatěžuje pneumatika rovnoměrně anebo takové nastavení, kdy nedojde k přehřátí pneumatiky. Vnitřní měření je použitelné na disciplíny, které se jezdí na více koleček a hrozí použití pneumatiky mimo její teplotní rozsah. Měřením tlaku dokážeme rozhodnout, při jakém tlaku pneumatiky provozovat, aby i přes celý závod byly v ideálním pracovním okně.

Z analýzy měření teploty povrchu pneumatiky jsme našli ideální nastavení podvozku elektrické formule pro disciplínu skidpad. Ideální nastavení je zvýšení negativního odklonu a tlak 0,75 bar. Testování nebylo dostačující a rozhodně by bylo vhodné použít větší variaci v odklonech, průměrech jezděných koleček ale i nastavení distribuce momentu. Pro zjištění nastavení pro ostatní disciplíny se musí použít jiný typ měření.

Interní měřicí desky mají relativně malý odběr. V práci nebylo dosaženo minima, které tvrdí katalogový list, a tedy firmware lze ještě upravit. Lze toho dosáhnout pomocí hlubokého spánku MCU, ale zdrojový kód se tím velmi komplikuje. Maximální odběr při zapnutém stavu by bylo vhodné snížit, protože se příliš proudově zatěžuje baterie a to může mít vliv na její životnost. Snížení odběru lze udělat např. změnou nábojové pumpy za boost měnič nebo spínáním jednotlivých senzorů postupně (nikoliv najednou jak tomu teď). Spolehlivost připojení je velmi citlivá na umístění antény hlavní desky. Anténa by měla mít nezakrytý výhled na kolo. V případě že není možné dosáhnout této podmínky lze umístit na vozidlo dvě hlavní desky a vždy jedna bude vyčítat data z dvou senzorů.

Odkazy

- [1] FSG: fs-germany.org [online]. *FSG: Formula Student Rules*. <https://www.formulastudent.de/fsg/rules>. 2021.
- [2] Pavel Ripka. *Senzory a převodníky*. Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN: 80-01-03123-3.
- [3] Jacob Fraden. *Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications*. Fifth edition. Springer, [2016]. ISBN: 978-3-319-19302-1.
- [4] *Strain Gauge Measurement - A Tutorial*. 078. Revision 1. National Instruments. Čvn. 1998. URL: http://elektron.pol.lublin.pl/elekp/ap_notes/ni_an078_strain_gauge_meas.pdf.
- [5] David R. LIDE Haynes William M. *CRC handbook of chemistry and physics: a ready-reference book of chemical and physical data*. 92nd ed. CRC Press, c2011. ISBN: 978-1-4398-5511-9.
- [6] Drivermod: drivermod.ca [online]. *How Much Camber is Too Much Camber?* <https://drivermod.ca/2016/01/29/how-much-camber/>. 2016.
- [7] Massimo Guiggiani. *The science of vehicle dynamics: handling, braking, and ride of road and race cars: handling, braking, and ride of road and race cars*. Book, Whole. Springer, 2014.
- [8] Mingyuan Bian et al. “A Dynamic Model for Tire/Road Friction Estimation under Combined Longitudinal/Lateral Slip Situation”. In: sv. 1. Dub. 2014. DOI: 10.4271/2014-01-0123.
- [9] Robin Heydon. *Bluetooth low energy: the developer's handbook*. English. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2013. ISBN: 9780132888363;013288836X;
- [10] Argenos: argenos.com [online]. *BLE Advertising Channels Spectrum*. <https://www.argenox.com/static/assets/ble-advertising-channels-spectrum.png>. 2021.
- [11] *Bluetooth Low Energy (BLE)*. 002-09833. 3.0. Cypress. 2015. URL: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-Component%5C_BLE%5C_v3.0-Software%20Module%20Datasheets-v03%5C_66-EN.pdf?fileId=8ac78c8c7d0d8da4017d0eae9ddf29e0.
- [12] Shahin Farahani. *ZigBee wireless networks and transceivers*. English. Burlington: Newnes, 2008. ISBN: 9780750683937;0750683937;
- [13] *MLX90640 32x24 IR Array*. 3901090640. Revision 12. Melexis. Pros. 2019.
- [14] *Digital absolute pressure sensor, 20 kPa to 550 kPa*. FXPS7550D4. v.6. NXP. Srp. 2020.
- [15] *I2C Bus Pullup Resistor Calculation*. SLVA689. Texas Instruments. Ún. 2015.
- [16] *Ceramic Input Capacitors Can Cause Overvoltage Transients*. AN88-4. Linear Technology. Břez. 2001.
- [17] *MLX90641 16x12 IR Array - Driver*. <https://github.com/melexis/mlx90641-library>. Melexis. Pros. 2020.
- [18] *High pulse drain impact on CR2032 coin cell battery capacity*. Nordic Semiconductor. Lis. 2011.

-
- [19] Qoitech. *The curious case of LoRaWAN® devices and coin cell batteries*. <https://www.thethingsnetwork.org/article/the-curious-case-of-lorawan-devices-and-coin-cell-batteries>. Přistoupeno: 2021-09-30.
- [20] *ESP32 Technical Reference Manual*. ESP32 TRM. v4.6. Espressif Systems. 2021. URL: https://www.st.com/resource/en/application%5C_note/an1348-st485-an-rs485-based-interface-with-lower-data-bit-errors-stmicroelectronics.pdf.
- [21] *ESP-IDF Programming Guide*. dev-810-gb886dc6. Release v5.0. Espressif Systems. 2021. URL: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/esp-idf-en-v5.0-dev-810-gb886dc6-esp32.pdf>.
- [22] *ST485: AN RS-485 BASED INTERFACE WITH LOWER DATA BIT ERRORS*. AN1348. v1. ST Microelectronics. 2004. URL: https://www.st.com/resource/en/application%5C_note/an1348-st485-an-rs485-based-interface-with-lower-data-bit-errors-stmicroelectronics.pdf.
- [23] *Prusament PETG*. Prusa Polymers. Led. 2020.
- [24] *Loctite EA 9466*. Henkel. 2019. URL: <http://tds.henkel.com/tds5/Studio/ShowPDF/243%20NEW-EN?pid=EA%209466&format=MTR&subformat=REAC&language=EN&plant=WERCS>.
- [25] Melexis. *MLX90640 Library*. <https://github.com/melexis/mlx90640-library>. 2021.
- [26] *MLX90640 32x24 IR Array - Driver*. <https://github.com/melexis/mlx90640-library>. Melexis. Pros. 2020.
- [27] *Infra-red Temperature Measurement*. 1502843017. v1. RS Components. 2005. URL: <https://docs.rs-online.com/050c/0900766b8001bab9.pdf>.
- [28] *Internal RC oscillator (HSI) calibration*. AN2868. 1. ST Microelectronics. 2009. URL: https://www.st.com/resource/en/application%5C_note/cd00221839-stm32f10xxx-internal-rc-oscillator-hsi-calibration-stmicroelectronics.pdf.
- [29] *STM32G0x1 advanced Arm®-based 32-bit MCUs*. RM0444. Rev 5. ST Microelectronics. 2020. URL: https://www.st.com/resource/en/reference%5C_manual/rm0444-stm32g0x1-advanced-armbased-32bit-mcus-stmicroelectronics.pdf.
- [30] *nRF52832 Product Specification v1.8*. nRF52832_PS_v1.8. v1.8. Nordic Semiconductor. 2021. URL: https://infocenter.nordicsemi.com/pdf/nRF52832%5C_PS%5C_v1.8.pdf.
- [31] Ian Johnson. *10 useful tips for using the floating point unit on the Cortex-M4*. Ed. <https://community.arm.com/>. [Online; posted 25-October-2013]. Říj. 2013. URL: <https://community.arm.com/arm-community-blogs/b/architectures-and-processors-blog/posts/10-useful-tips-to-using-the-floating-point-unit-on-the-arm-cortex-m4-processor?pi353792392=2>.
- [32] *nRF52832 - Errata Version 3*. 4397.883 v1.1. v1.1. Nordic Semiconductor. 2021. URL: https://infocenter.nordicsemi.com/pdf/nRF52832%5C_Rev%5C_3%5C_Errata%5C_v1.1.pdf.
-

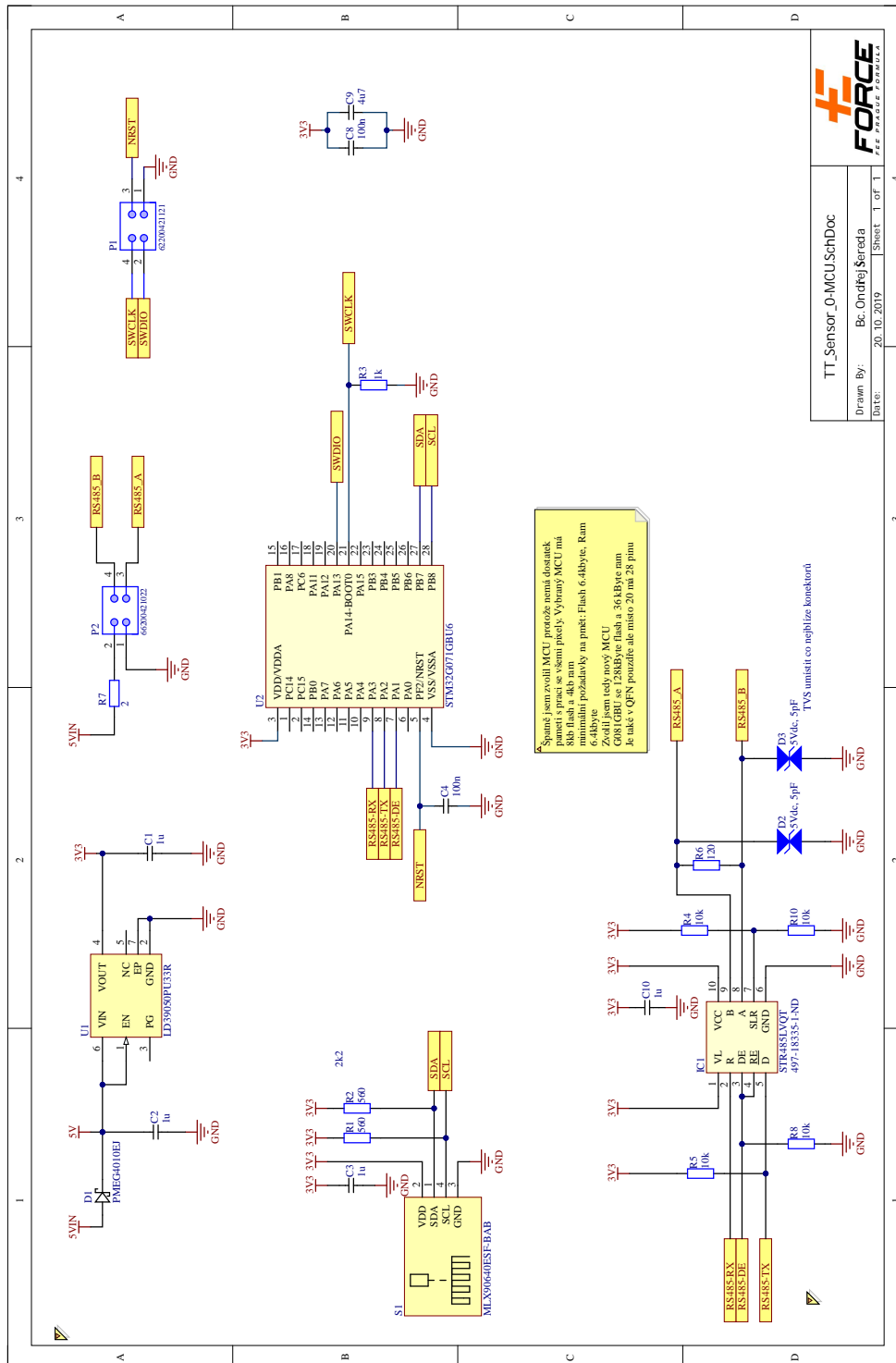


- [33] *CAN Bit Timing Requirements*. AN1798. <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN1798.pdf>. Freescale Semiconductor.
- [34] Heinz-Jürgen Oertel. *CAN Bit Time Calculation*. 2010. URL: <http://www.bittiming.can-wiki.info/> (cit. 30.09.2021).

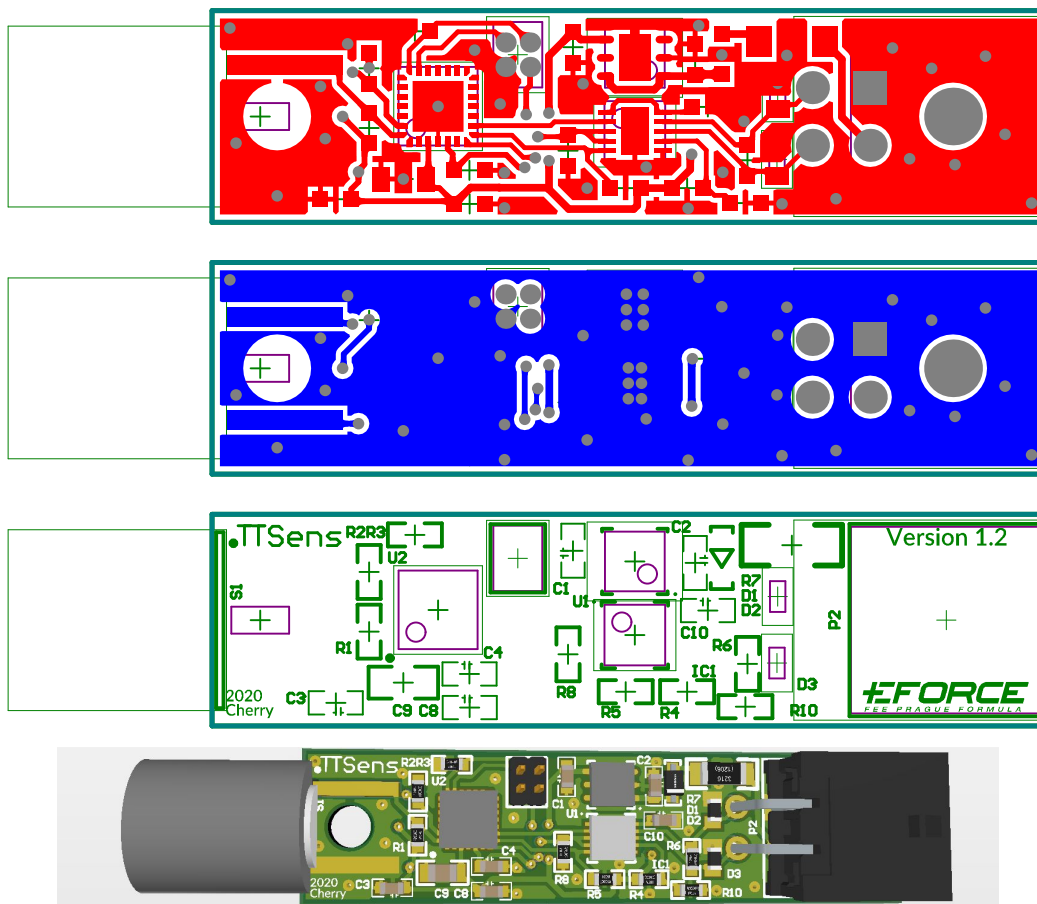


A Přílohy

A.1 Schéma externí desky

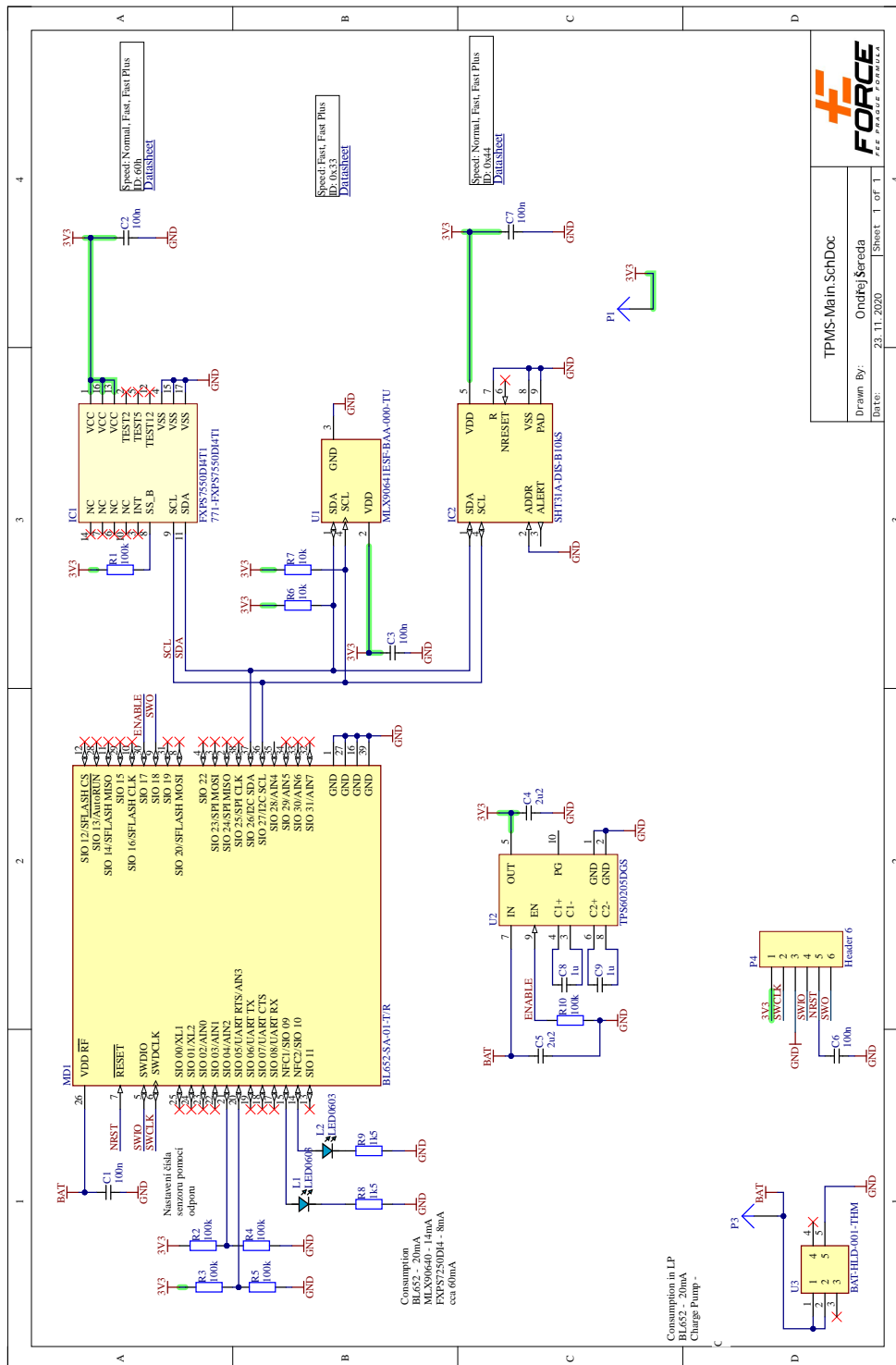


A.2 Layout externí desky

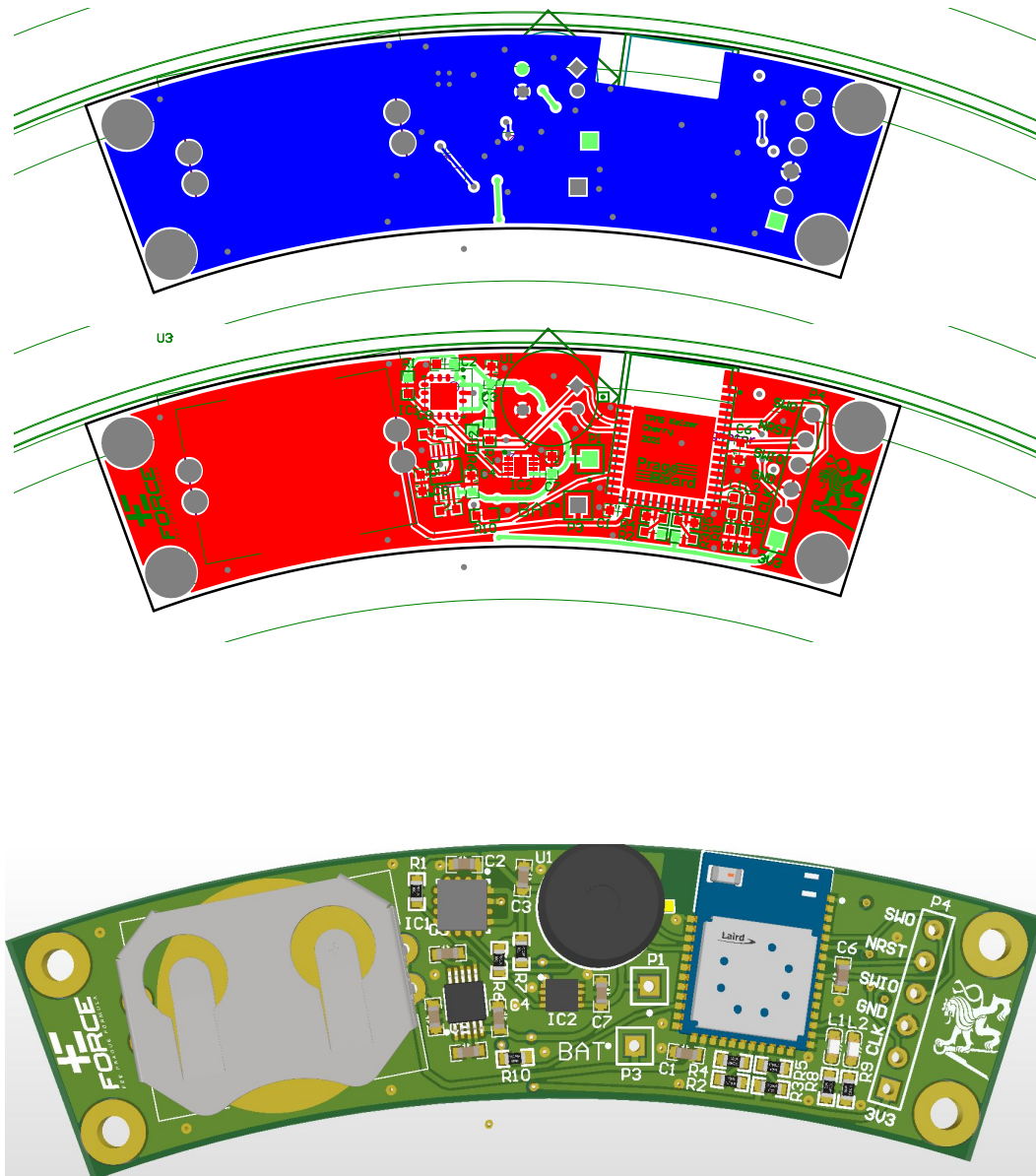




A.3 Schéma interní desky

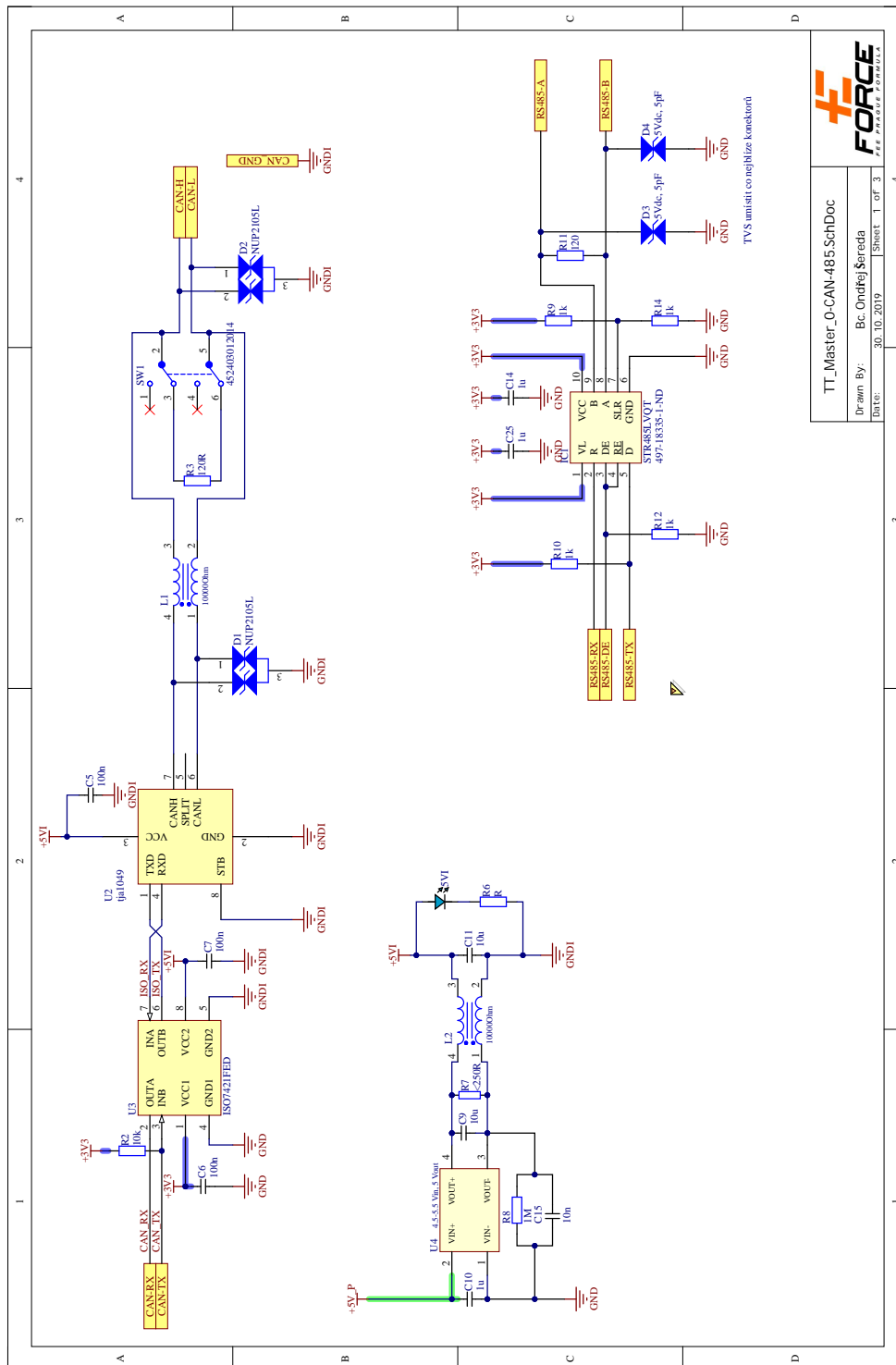


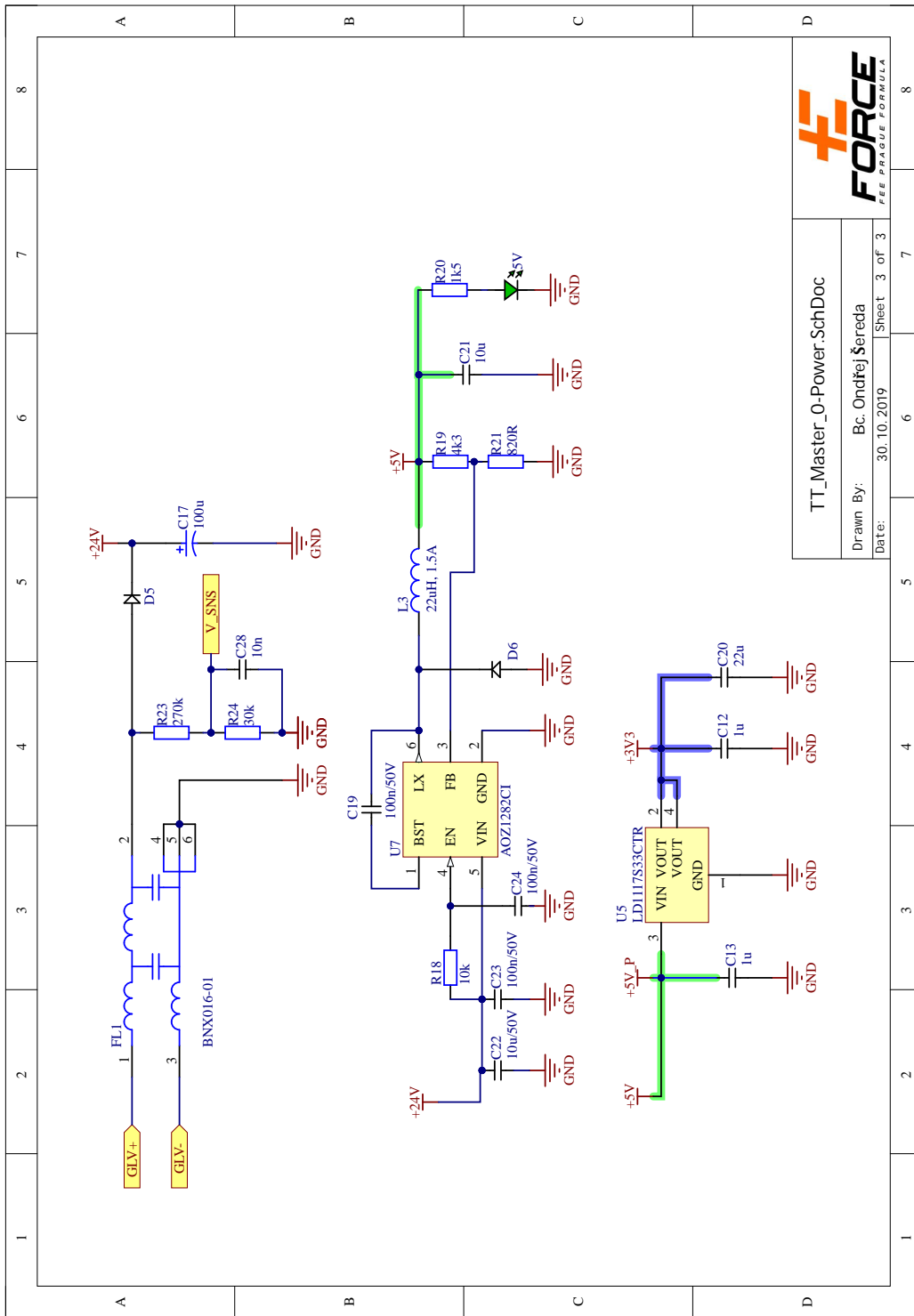
A.4 Layout interní desky





A.5 Schéma hlavní desky





A.6 Layout hlavní desky

