



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

## BEZPEČNOSTNÍ SYSTÉMY VOZIDEL

VEHICLE SAFETY SYSTEMS

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

František Langr

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Aleš Povalač, Ph.D.

BRNO 2022

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Elektronika a komunikační technologie**

Ústav radioelektroniky

**Student:** František Langr

**ID:** 203514

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2021/22

**NÁZEV TÉMATU:**

## Bezpečnostní systémy vozidel

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Provedte rešerši stávajících bezpečnostních systémů používaných v automobilovém průmyslu. Vyberte systémy vhodné pro implementaci ve zmenšeném modelu automobilu – demonstrátoru. Navrhněte blokovou koncepci elektroniky demonstrátoru, která bude pomocí senzorů vyhodnocovat nebezpečí kolize a vhodným způsobem riziko snižovat.

Navrhněte a realizujte mechaniku modelu reálného prototypu demonstrátoru pomocí 3D tisku. Navrhněte schéma zapojení a plošné spoje včetně vhodného dálkového ovládání. Naprogramujte obslužný firmware. Vyhodnoťte funkční bezpečnost navrženého řešení a demonstруйте funkci bezpečnostních systémů implementovaných v modelu.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Cooperative Vehicular Safety Applications. IEEE Control Systems [online]. 2010, 30(4), 38-53 [cit. 2020-06-17]. DOI: 10.1109/MCS.2010.937003. ISSN 1066-033X. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5510714/>

[2] What is the ISO 26262 Functional Safety Standard? [online]. National Instruments, 2019 [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: <https://www.ni.com/cs-cz/innovations/white-papers/11/what-is-the-iso-26262-functional-safety-standard-.html>

**Termín zadání:** 11.2.2022

**Termín odevzdání:** 1.6.2022

**Vedoucí práce:** Ing. Aleš Povalač, Ph.D.

**doc. Ing. Lucie Hudcová, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá rešerší bezpečnostních systémů používaných v automobilovém průmyslu a jejich vhodné implementaci do zmenšeného modelu (demonstrátoru). Pro zmenšený model jsou vybrány aktivní bezpečnostní systémy založené na senzorech vzdálenosti různých principů. Práce obsahuje detailní popis vybraných senzorů společně s výběrem vhodného ovládání demonstrátoru. Jsou zde vysvětleny systémy aktivní a pasivní bezpečnosti a asistenční systémy vozidel. Práce dále diskutuje o návrhu jednotlivých 3D tištěných dílů podvozku demonstrátoru a jejich vývoji. Popsány jsou také součástky a zapojení DPS demonstrátoru společně s použitým bezpečnostním algoritmem a obslužným firmwarem.

## **Klíčová slova**

senzor, demonstrátor, bezpečnost, koncept, 3D tisk

## **Abstract**

This thesis looks into car industry safety systems research and an appropriate implementation into a scale model (demonstrator). For the model there are selected active safety systems based on distance sensors of various principles. The thesis contains a detailed description of the selected sensors together with the selection of a suitable demonstrator control device. There are active and passive safety and vehicle assistance systems explained. The thesis further discusses the design of individual 3D printed parts of the demonstrator chassis and their development. The components and circuitry of the PCB are also described, along with the safety algorithm used and the operating firmware.

## **Keywords**

sensor, demonstrator, safety, concept, 3D print

## **Bibliografická citace:**

LANGR, František. *Bezpečnostní systémy vozidel* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-06-14]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/141624>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce Aleš Povalač.

## **Prohlášení**

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

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

V Brně dne: 14. června 2022

.....  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu této bakalářské práce Ing. Alešovi Povalačovi, Ph.D. za motivaci, odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: 14. června 2022

.....  
podpis autora

# Obsah

1.	Úvod.....	14
2.	Bezpečnostní systémy vozidel .....	15
2.1	Pasivní bezpečnostní systémy .....	15
2.2	Aktivní bezpečnostní systémy.....	15
2.3	Asistenční systémy vozidel .....	15
2.3.1	Senzory pro asistenční systémy vozidel .....	16
2.4	Bezpečnostní systémy elektromobilů.....	17
3.	Koncept zmenšeného modelu .....	18
3.1	Konstrukce podvozku demonstrátoru .....	18
3.1.1	Návrh jednotlivých 3D tištěných dílů demonstrátoru.....	19
3.2	Výběr materiálů.....	22
3.2.1	PETG .....	23
3.2.2	TPE 88 .....	23
3.3	Vlastnosti modelu z hlediska 3D tisku.....	23
3.4	Koncept elektroniky demonstrátoru .....	27
4.	Výběr Elektroniky pro zmenšený model.....	28
4.1	Senzor vzdálenosti VL53L0X.....	28
4.1.1	Vlastnosti senzoru VL53L0X .....	28
4.1.2	Princip senzorů Time-of-Flight .....	28
4.1.3	Modul se senzorem VL53L0X .....	29
4.1.4	Režimy senzoru VL53L0X.....	30
4.2	Senzor vzdálenosti VL53L1X.....	32
4.2.1	Vlastnosti senzoru VL53L1X .....	33
4.2.2	Princip měřící metody senzoru VL53L1X.....	33
4.2.3	Modul se senzorem VL53L1X .....	33
4.2.4	Režimy senzoru VL53L1X.....	34
4.3	Senzor vzdálenosti US-100 .....	36
4.3.1	Vlastnosti senzoru US-100 .....	36
4.3.2	Principy měření senzorem US-100 .....	37
4.4	Senzor vzdálenosti RPLIDAR A1M8.....	38
4.4.1	Komunikace se senzorem RPLIDAR A1M8.....	39

4.4.2	RPLIDAR A1M8 vývojový kit.....	40
4.5	Srovnání senzorů vzdálenosti.....	41
4.6	Výběr ovladače zmenšeného modelu.....	41
5.	Hardware a software .....	43
5.1	Popis součástí DPS shieldu .....	43
5.1.1	Napájecí blok .....	44
5.1.2	Pohon demonstrátoru .....	44
5.1.3	Konektory .....	45
5.2	Vývojová deska Nucleo .....	46
5.3	Software .....	46
5.3.1	Popis důležitých částí programu .....	46
5.3.2	Program pro zastavení před překážkou.....	48
6.	Závěr .....	49



## Seznam zkratek

ABS	...	Antilock Braking Systém
ASR	...	Anti Skid Regulation
ESP	...	Electronic Stability Program
BA	...	Brake Assistant
EBV	...	Elektronische Bremskraftverteilung
EBC	...	Electronic Brakeforce Control
AFS	...	Active Freeze Suspension
ANB	...	Automatische Notbremsung
ACC	...	Adaptive/Active Cruise Control
HUD	...	Head-up Display
LDW	...	Lane Departure Warning
GPS	...	Global Positioning Systém
APS	...	Acoustic Parking Systém
VCSEL	...	Vertical Cavity Surface-Emitting Laser
SPAD	...	Single Photon Avalanche Diode
FoV	...	Field of View
ToF	...	Time-of-Flight
IR	...	Infra-Red
API	...	Application Programming Interface
ROI	...	Region of Intrest
UART	...	Universal Asynchronous Reciever/Transmitter
LIDAR	...	Light Detection And Ranging
2D	...	Two-Dimensional
USB	...	Universal Seriál Bus
TTL	...	Time to Live
3D	...	Three-Dimensional
WI-FI	...	Wireless Ethernet Compatibility Aliance
DPS	...	Deska plošných spojů
Li-Ion	...	Lithium-Ion
PETG	...	Glykolem modifikovaný Polyethylen

TPE 88	...	Thermoplastic elastomer
I2C	...	Inter-Integrated Circuit
SPI	...	Seriál Peripheral Interface
LED	...	Light-Emitting Diode
PWM	...	Pulse Width Modulation
GPIO	...	General-purpose input/output
CPU	...	Central Processing Unit
USART	...	Universal Synchronous/Asynchronous

Reciever/Transmitter

## Seznam obrázků

Obr. 3-1: Polovina nápravy demonstrátoru.....	18
Obr. 3-2: Srovnání původního a finálního návrhu zavěšení motoru.....	19
Obr. 3-3: Kolo a pneumatika finálního modelu demonstrátoru.....	19
Obr. 3-4: Jednotlivé verze ramene zavěšení .....	20
Obr. 3-5: Jednotlivé verze pouzdra pro motor .....	21
Obr. 3-6: Jednotlivé verze odpružení.....	21
Obr. 3-7: Jednotlivé verze středového dílu .....	22
Obr. 3-8: Rozdíl kvality 3D tisku změnou nastavení tiskového profilu .....	23
Obr. 3-9: Řez osou otáčení zavěšeného pouzdra s motorem .....	24
Obr. 3-10: Orientace ramene zavěšení vůči tiskové podložce.....	24
Obr. 3-11: Umístění výztuhy uvnitř ramene zavěšení .....	25
Obr. 3-12: Náhled na tisk první vrstvy tvořící díru s a bez zaslepení.....	25
Obr. 3-13: Výchozí model demonstrátoru .....	26
Obr. 3-14: Finální model demonstrátoru .....	26
Obr. 3-15: Fotografie reálného demonstrátoru .....	26
Obr. 3-16: Základní blokové schéma elektroniky demonstrátoru .....	27
Obr. 4-1: Senzor vzdálenosti VL53L0X [1] .....	28
Obr. 4-2: Princip senzoru Time-of-Flight [3] .....	29
Obr. 4-3: Modul Pololu 2490 s popisem pinů 50 [4].....	29
Obr. 4-4: Schéma zapojení modulu Pololu 2490 [4] .....	30
Obr. 4-5: Graf naměřené vzdálenosti proti skutečné (výchozí režim měření) [1]....	32
Obr. 4-6: Senzor vzdálenosti VL53L1X [7] .....	32
Obr. 4-7: Modul Pololu 3415 s popisem pinů [8].....	34
Obr. 4-8: Senzor vzdálenosti US-100 [10] .....	36
Obr. 4-9: Časový diagram pulzů při měření vzdálenosti senzorem US-100 [13]....	37
Obr. 4-10: Senzor vzdálenosti RPLIDAR A1M8 [15] .....	39
Obr. 4-11: Bloky měřených dat senzoru RPLIDAR A1M8 [15].....	40
Obr. 5-1: Blokové schéma elektroniky demonstrátoru .....	43
Obr. 5-2: Fotografie DPS shieldu pro Nucleo .....	43
Obr. 5-3: Fotografie DPS pro akumulátory .....	44

Obr. 5-4: Schéma zapojení motorů k H můstku L298n.....	45
Obr. 5-5: Vývojová deska NUCLEO-F429ZI .....	46
Obr. 5-6: Vývojový diagram programu pro zastavení před překážkou .....	48

## Seznam tabulek

Tabulka 4-1: Vlastnosti senzoru VL53L0X [1] .....	28
Tabulka 4-2: Popis pinů modulu Pololu 2490 [4].....	30
Tabulka 4-3: Měřicí profily z API [5] .....	31
Tabulka 4-4: Přesnost měření udávána výrobcem [1] .....	31
Tabulka 4-5: Vlastnosti senzoru VL53L1X [7] .....	33
Tabulka 4-6: Vzdálenostní módy [9] .....	34
Tabulka 4-7: Přesnost měření v tmavém prostředí [7] .....	34
Tabulka 4-8: Ovlivnění měření v tmavém prostředí změnou ROI [7] .....	36
Tabulka 4-9: Vlastnosti senzoru US-100 [11], [12].....	36
Tabulka 4-10: Vlastnosti senzoru vzdálenosti RPLIDAR A1M8 [15].....	39
Tabulka 4-11: Data v měřeném vzorku senzoru RPLIDAR A1M8 [15].....	40
Tabulka 4-12: Srovnání senzorů vzdálenosti [1], [7], [8], [11], [12], [15].....	41

# 1. ÚVOD

Počet dopravních nehod v České republice posledních 10 let stoupá. Za rok 2019 došlo k 107 572 dopravním nehodám v silniční dopravě, při nichž zemřelo 618 osob. Většina nehod, ve kterých došlo ke zranění, byla způsobena řidičem. [17]

Jedna z podobných statistik mě vedla k výběru zadání této práce. V rámci práce je navrhován model automobilu (demonstrátor), do kterého jsou implementovány aktivní bezpečnostní systémy založené na principu kontinuálního měření vzdálenosti od objektů v okolí demonstrátoru. V případě detekce překážky dojde k zásahu do řízení a pohon se zastaví tak, aby se předešlo nárazu.

Práce volně navazuje na mou maturitní práci, ve které jsem rovněž navrhoval zmenšený model automobilu s různými senzory.

Automobily v dnešní době obsahují velké množství bezpečnostních systémů, jejichž rešerše je součástí kapitoly 2 této práce. Bezpečnostní systémy vozidel se obecně dělí na aktivní a pasivní. Aktivní bezpečnostní systémy se snaží předcházet dopravním nehodám a zmírnit jejich následky, zatímco pasivní bezpečnostní systémy mají za úkol v případě nehody ochránit posádku a další účastníky silničního provozu.

Kapitola 3 se zabývá koncepcí mechaniky a elektroniky zmenšeného modelu. V této kapitole je popsána konstrukce podvozku a jednotlivých 3D tištěných dílů demonstrátoru. Model je navržen v parametrickém programu Autodesk Fusion 360 a vytištěný na 3D tiskárně. Výběru materiálů a vlastnostem modelu z hlediska 3D tisku se tato kapitola věnuje rovněž.

Výběr senzorů a výběr způsobu ovládání popisuje kapitola 4. Ta se věnuje senzorům vhodným pro implementaci do demonstrátoru, které byly mimo jiné vybrány na základě dostupnosti, vhodného měřitelného rozsahu, velikosti a přesnosti. V kapitole je vysvětleno, na jakém principu měření senzory fungují, i způsob jejich komunikace a obsluhy.

Hardware a software je popsán v kapitole 5. Je zde popis jednotlivých bloků součástek DPS shieldu nasazované na vývojovou desku Nucleo. Dále se kapitola věnuje popisu Nuclea, vývojovému diagramu a důležitým částem programu.

## 2. BEZPEČNOSTNÍ SYSTÉMY VOZIDEL

Zvýšení bezpečnosti je spolu se zvýšením hospodárnosti, jízdního pohodlí a zlepšením životního prostředí jedním z hlavních důvodů umístování elektroniky do motorových vozidel. Použití elektroniky v motorovém vozidle vede k odlehčení řidiče, který tak může lépe pozorovat vnější dopravní děje. Elektronické sledování okolí vozidla tvoří základ mnoha systémů podpory řidiče. Asistenční systémy upozorňují řidiče na nebezpečné situace a v naléhavých případech dokonce samostatně zasahují do řízení. Skutečné asistenční systémy řidiče zamezují nebezpečným situacím dříve, než vzniknou. [6]

### 2.1 Pasivní bezpečnostní systémy

Pasivní bezpečnostní systémy mají za úkol při dopravní nehodě ochránit posádku vozidla a další účastníky dopravního provozu. Tyto systémy zmírňují následky dopravní nehody během nárazu a po něm. Hlavními zástupci těchto bezpečnostních systémů jsou airbagy, bezpečnostní pásy a deformační zóny. [19]

### 2.2 Aktivní bezpečnostní systémy

Aktivní bezpečnostní systémy mají za úkol předcházet dopravním nehodám. Tyto systémy neustále vyhodnocují vozidlo, případně jeho okolí. Řidič má díky těmto systémům větší kontrolu v nebezpečných situacích. Pokud je kolize nevyhnutelná, aktivní bezpečnostní systémy jsou schopné například snížit rychlost vozidla. Aktivní bezpečnostní systémy nemají za úkol pouze snížit počet dopravních nehod, ale také redukovat následky nehod, pokud jsou nevyhnutelné. [18]

### 2.3 Asistenční systémy vozidel

Asistenční systémy vozidel lze rozdělit do dvou skupin [6]:

- asistenční systémy pro bezpečnou jízdu vozidla;
- asistenční systémy podporující řidiče.

#### **Asistenční systémy pro bezpečnou jízdu vozidla**

V případě nutnosti působí tyto systémy přímo, aniž by mohl řidič jejich činnosti zabránit. Působí na pozadí, takže jejich účinky nemusí řidič vůbec poznat. Tyto systémy se vyznačují svou rychlostí a precizností. Mezi asistenční systémy podporující vozidlo patří například [6]:

- protiblokovací systém ABS;
- protiprokluzový systém ASR;
- elektronická stabilizace jízdy ESP;
- brzdový asistenční systém BA;
- elektronická distribuce brzdné síly EBV/EBC;
- aktivní stabilizace podvozku AFS;
- systémy pro automatické nouzové brždění ANB.

## **Asistenční systémy podporující řidiče**

Tyto asistenční systémy podporují řidiče nepřímo, tím, že ho informují o situaci a varují před nebezpečím. Řidič na základě těchto varování může činit lepší rozhodnutí. Tyto asistenční systémy nemají kontrolu nad vozidlem a řidič rozhoduje o tom, zda budou použity. Mezi asistenční systémy řidiče patří například [6]:

- adaptivní kontrola vzdálenosti ACC;
- virtuální zobrazovač HUD;
- infračervené noční vidění;
- asistenční systém udržování jízdního pruhu LDW;
- navigační systém GPS;
- parkovací asistenční systém APS;
- hlasové ovládání obslužných prvků vozidla.

### **2.3.1 Senzory pro asistenční systémy vozidel**

Pro asistenční systémy vozidel se používají senzory [6]:

- infračervené;
- ultrazvukové;
- radarové;
- laserové;
- videokamery.

#### **Infračervené senzory**

Infračervené senzory jsou založené na skutečnosti, že všechny formy hmoty vyzařují při teplotách vyšších než absolutní nula tepelné záření ve viditelném i neviditelném pásmu spektra. Toto záření se zachytává detektory a převádí na elektrický signál (digitalizuje). Termografie převádí dopadající nebo vyzařované infračervené záření povrchu na obrazový signál, který se zobrazuje na monitoru v řadě barevných odstínů, z nichž každý znamená určitý teplotní rozsah. Snímací infračervené kamery mohou být buď na principu tepelných senzorů, kde dochází při absorpci fotonů k oteplení citlivé části senzoru a pohlcená energie se vyhodnocuje nepřímo přes senzory teploty, nebo v provedení jako kvantové senzory s vyhodnocením infračerveného záření cestou fotoelektrického jevu. [6]

#### **Ultrazvukové senzory**

Ultrazvukové senzory jsou založené na principu měření času, který uběhne od vyslání vysokofrekvenčního zvukového signálu do příjmu zpětně odraženého signálu od objektu. Od většiny objektů se zvukové vlny odrážejí a díky tomu je lze detekovat. Maximální měřená vzdálenost závisí na odrazivých vlastnostech objektu, jeho velikosti, materiálu a povrchu. Vysílaný paprsek je možné soustředit pomocí reflektoru. Ultrazvukový signál vyslaný vysílačem je kódovaný pro eliminaci rušení a jeho frekvence se řádově pohybuje ve stovkách kHz. Ultrazvukové senzory se používají zejména u systémů, které usnadňují zaparkování. [6]

#### **Radarové senzory**

Radiolokátor (radar) je přístroj, který pomocí velmi krátkých elektromagnetických vln identifikuje, zaměřuje a následně určí vzdálenost objektu. Silné svazky vln se vysílají



v krátkých impulzech a v pauzách se přijímají vlny odražené od objektů. Vysílané vlnové svazky se odrážejí od povrchu kovů, případně materiálů s vysokou permitivitou. Radar vysílaný signál moduluje a přijímaný demoduluje. Vzdálenost objektu se pak určí pomocí interference vyslaného a odraženého signálu. Silniční radary měří rychlost vozidla na principu Dopplerova jevu. Objekt se při daném měření musí pohybovat. [6]

### **Laserové senzory**

Některé laserové senzory pracují na principu triangulační metody měření. Část laserového paprsku dopadajícího na měřený objekt se odrazí zpět pod určitým úhlem. Tento úhel se mění v závislosti na vzdálenosti objektu od senzoru. Vzdálenost je pak určena přepočtem z tohoto úhlu. LIDAR je podobný radaru. Na rozdíl od radaru, který používá k měření rádiové vlny, LIDAR využívá přerušovaný laserový paprsek. Tento paprsek projde přes optické čočky, odrazí se od objektu a putuje zpět do optického přijímače. [6]

### **Videosenzory**

Videokamery umístěné v přední části vozidla jsou schopné identifikovat jízdní pruh, detekovat značky, vozidla a další překážky. Obraz zaznamenaný kamerou se vyhodnocuje a zpracovává. V oblasti zadní části vozidel pak kamery pomáhají při parkování. Asistenční systémy pro řidiče založené na videokamerách značně zvyšují bezpečnost a komfort v silniční dopravě. [6] Soustava videokamer doplněná senzory umožňuje autonomní řízení vozidel.

## **2.4 Bezpečnostní systémy elektromobilů**

Elektromobily jsou konstruovány s ohledem na typ pohonu a jeho zdroje energie, čemuž je také přizpůsobena bezpečnost. Akumulátory jsou umístěny v odolných pouzdrech. Při dopravní nehodě jsou elektromobily nebezpečné, zejména kvůli akumulátoru. Při poškození akumulátoru dojde k jeho zkratu, což má za následek hoření a uvolňování toxických látek.

Elektromobil se může v případě požáru velmi razantně rozjet a hasiči proto zvažují rozestavění zasahujících vozidel kolem hořícího elektromobilu. Hašení elektromobilu probíhá jinak než u klasického automobilu se spalovacím motorem. [20]

Požár vysokonapěťového akumulátoru se hasí vodou. Malé požáry, které nezahrnují akumulátor, se hasí běžnými postupy. Vozidlo se nesmí po nehodě přepravovat s koly na zemi z důvodu možnosti přehřátí a vznícení některých částí. [22]

V roce 2019 se stal elektromobil Tesla Model 3 nejbezpečnějším ve své třídě stejně tak jako Tesla Model X. [21]

### 3. KONCEPT ZMENŠENÉHO MODELU

Tato kapitola se věnuje detailnímu popisu konstrukce podvozku demonstrátoru, popisem jednotlivých verzí tištěných dílů, výběrem materiálů pro 3D tisk modelu, vlastnostem modelu z hlediska 3D tisku a základním konceptem elektroniky demonstrátoru, který má za úkol demonstrovat bezpečnostní prvky používané v automobilech.

#### 3.1 Konstrukce podvozku demonstrátoru

Konstrukce podvozku byla navržena tak, aby ji bylo možné snadno vytisknout na 3D tiskárně. Při návrhu byl brán zřetel na jednoduchost. Byla zvolena konstrukce pro pohon všech kol, bez možnosti zatáčení předních kol, a to z důvodu právě jednoduchosti jak konstrukce, tak pohybu demonstrátoru.

Hlavní část podvozku tvoří dvě stejné nápravy. Podvozek je díky tomu vyvážený a s pomocí zrcadlení bylo nutné navrhnout pouze jednu sestavu zavěšení tvořící polovinu nápravy demonstrátoru (Obr. 3-1). Toto zavěšení se skládá z motoru s převodovkou, na kterém je uchycené kolo. Samotný motor je pak uchycen v dvoudílném pouzdře. Toto pouzdro je připojeno k rameni pomocí otočného kloubu zajištěného víčkem se závitem a také pomocí pružiny. Rameno je připojeno ke středové části podvozku. Díky této konstrukci je každé kolo nezávisle odpruženo.



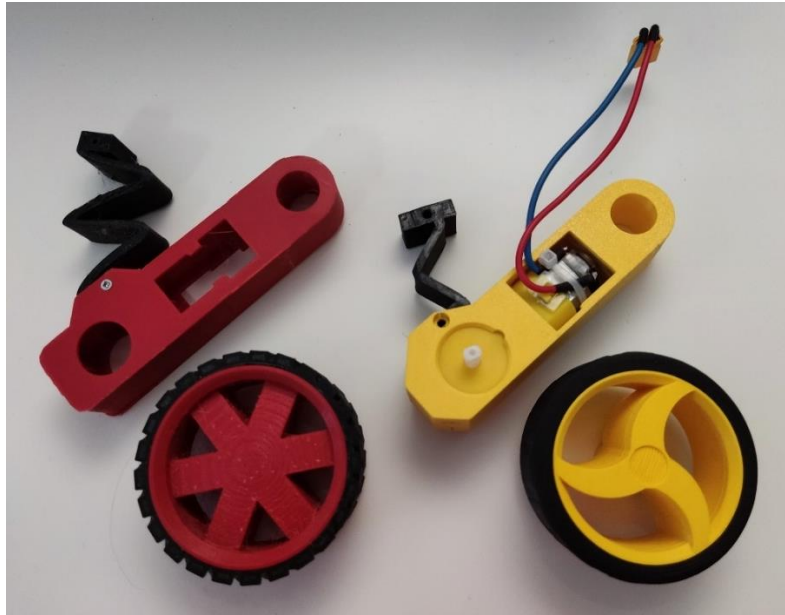
**Obr. 3-1: Polovina nápravy demonstrátoru**

Rozvor a rozchod kol podvozku demonstrátoru pro verzi s odpružením je v měřítku s reálným vozidlem.

Celá konstrukce je rozebíratelná. Všechny díly jsou spojené jednotným typem spojovacího materiálu, a to šrouby M3x10 s válcovou hlavou a příslušnými maticemi. Podvozek je možné snadno rozebrat případně vyměnit libovolný díl. Například pružiny je možné vyměnit za pružiny s jinými vlastnostmi nebo za pevnou součást, a tak podvozek snížit a zpevnit. Šrouby pro výměnu pružiny jsou na dostupném místě z venku modelu, zatímco šrouby držící motor v pouzdře jsou umístěny zevnitř. Dobře dostupné jsou rovněž šrouby pro uchycení ramen, horní desky, nárazníků i kol.

Do středu konstrukce podvozku je možné umístit akumulátor s články typu Li-Ion 18650, a to až se třemi do série.

### 3.1.1 Návrh jednotlivých 3D tištěných dílů demonstrátoru



**Obr. 3-2: Srovnání původního a finálního návrhu zavěšení motoru**

#### **Popis k Obr. 3-2**

Původní zavěšení motoru vykazovalo po vytisknutí velkou řadu nedostatků. Nedostatky původního pouzdra pro motor jsou rozebrány v odstavci: Popis k Obr. 3-5.

Použitý flexibilní materiál byl velice tuhý a vytištěné díly měly kluzký povrch. Nehodil se pro tisk pneumatik (pneumatiky neměly v podstatě žádný záběr). Původně měla být kola nasunutá přímo na osy motorů (tak jako se připevňují komerčně dostupná kola k těmto motorům). I po několika iteracích se nepodařilo docílit dostatečného spojení pouhým zasunutím. Finální verze používá k připevnění kol přítlačný šroubek, který drží v disku kola a tlačí na osu motoru.

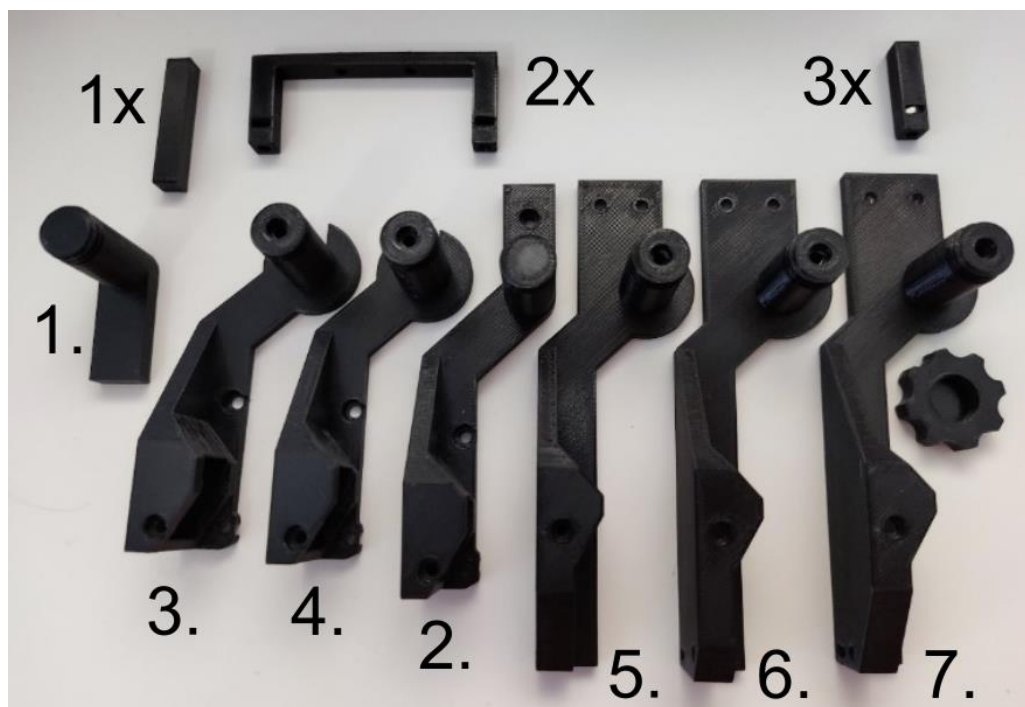
Z důvodu závažných nedostatků zjištěných po vytisknutí zavěšení motoru původního modelu demonstrátoru, byl finální model modelován znovu se zřetelem k daným chybám.



**Obr. 3-3: Kolo a pneumatika finálního modelu demonstrátoru**

Původní pneumatiky byly na kole nasunuté a měly tendenci prokluzovat. Finální verze má po obvodu disku drážky (Obr. 3-3), do kterých zapadne protikus na

pneumatikách a vyloučí jakýkoli prokluz. Pneumatiky jsou vytištěné duté kvůli lepší přilnavosti a zároveň fungují i jako další pružný prvek v konstrukci. Při modelování dezénu pneumatik, bylo myšleno především na maximální přilnavost k hladkým povrchům. Takto vytištěné pneumatiky přesto nedosahují kvalit těch komerčně vyrobených.

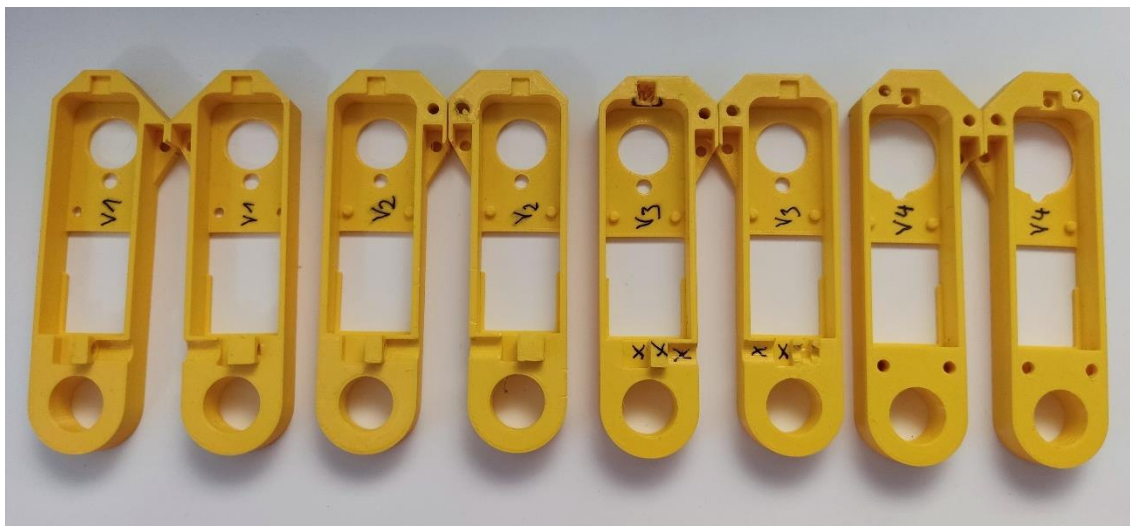


**Obr. 3-4: Jednotlivé verze ramene zavěšení**

#### **Popis k Obr. 3-4**

Rameno zavěšení má za úkol držet pohromadě polovinu nápravy s nárazníkem, horní deskou pro upevnění Nuclea a středovým dílem podvozku demonstrátoru.

První verze ramene zavěšení měla za úkol zjistit tolerance výztuhy (1x), prostoru pro pouzdro motoru a funkci závitů pro víčko. Dalším úkolem první verze bylo zjistit, jak hladce se bude kloub zavěšení otáčet. Druhá verze kompenzovala zjištění z první verze a testovala i uchycení odpružení. Počítala s případným připojením ke středové části. Třetí a čtvrtá verze využívala jako výztuhu díl 2x, obě verze počítaly s propojením výztuh pro jeden bok demonstrátoru, řešení se ukázalo jako nevhodné z důvodu malé pevnosti výztuhy v místě uchycení ke středové části. Od páté verze se počítalo s uchycením ramene zavěšení přímo ke středové části dvěma šrouby (daleko robustnější řešení oproti spojení výztuhou), výztuhou 3x a rovněž s možností připevnění nárazníku. Šestá verze rozšiřuje řešení páté o možnost připevnění horní desky pro uchycení Nuclea. Poslední verze zlepšuje přístupnost šroubu pro připevnění toto uchycení. Model víčka se od první verze neměnil.



**Obr. 3-5: Jednotlivé verze pouzdra pro motor**

#### **Popis k Obr. 3-5**

Pouzdro pro motor má za úkol připevnit motor k ramenu zavěšení s jedním stupněm volnosti přes kloub s limitací odpružením.

Model první verze pouzdra pro motor vychází z původního návrhu demonstrátoru (Obr. 3-2 a Obr. 3-13). Hlavní změny vůči původnímu návrhu byly v uchycení odpružení, spojení obou dílů pouzdra, druhu spojovacího materiálu a dělení pouzdra na dva díly (původní pouzdro bylo rozděleno jako pouzdro pro celý motor a příklopná deska). Uchycení odpružení ve v1 již nezávisí pouze na šroubech, pružina je zaháknuta ve výtisku a zajištěna šroubem. Jako spojovací materiál byly použity šrouby typu M3 namísto samořezných vrutů do plastu (zejména z důvodu možnosti mnohonásobného rozebírání a dostupnosti spojovacího materiálu). Pouzdro pro motor je oproti předchozí verzi rozděleno v polovině, tudíž nedochází k prohýbání příklopné desky a v obou částech je prostor pro hlavy šroubů a matice.

Při druhé verzi byla snaha vyřešit nedostatečný přítlak obou dílů (díly měly mezi sebou vůli) dalším šroubem (první verze používala ke spojení pouze jeden šroub). Při třetí verzi došlo ke změně tolerancí. Poslední verze vyřešila vůli mezi díly spojením dílů čtyřmi šrouby. Rovněž došlo ke zvětšení otvorů kolem os otáčení motoru, kvůli možným kolizím s uchycením kola.



**Obr. 3-6: Jednotlivé verze odpružení**

### Popis k Obr. 3-6

Odpružení prodělávalo změny mezi jednotlivými verzemi zejména v oblastech uchycení, ať už k pouzdru motoru nebo k ramenu zavěšení. Druhou největší změnou je odstoupení od konceptu odpružení s vedením. V prvotních verzích byl uprostřed pružiny prostor pro vedení, které mělo za úkol udržet pružinu při kompresi (zamezit přílišnému ohybu pružiny do některých stran). Do budoucna mělo být toto vedení zakončeno převodem se servomotorem a mělo sloužit k možnosti nastavení světlé výšky podvozku. Z hlediska složitosti realizace tento koncept nakonec nebyl realizován.

Tuhost pružiny určuje její výplň (nastavitelné ve sliceru v procentech) a tloušťka.



Obr. 3-7: Jednotlivé verze středového dílu

### Popis k Obr. 3-7

Středový díl má za úkol držet pohromadě všechna ramena zavěšení demonstrátoru. Prochází jím a je k němu připevněna DPS s akumulátory. Drží rovněž horní desku pro upevnění Nuclea a je připraven pro upevnění spodních ochranných krytů a případných nárazníků.

První verze (úplně vlevo) vychází z návrhu osmiúhelníku jejímž středem by procházel akumulátor. Vrchní stěna osmiúhelníku byla rozšířena tak, aby k ní bylo možné uchytit horní desku pro Nucleo. Výřezy ve spodní části jsou pro připevnění spodních ochranných krytů, které měly obsahovat tlumící prvky nárazníků. Druhá (prostřední) verze byla upravena především z důvodu kolize otočných os motorů s DPS akumulátorů při použití verze bez odpružení. Bylo nutné celou DPS posunout výše a tím pádem vytvořit ve spodní části středového dílu vyvýšený blok materiálu. Akumulátory by se kvůli vyvýšení nevešly dovnitř osmiúhelníku, bylo tedy nutné odstranit horní stěnu. Na tuhost středového dílu tato změna neměla zásadní vliv. Samotná DPS je připevněna k 3D tištěnému dílu a ten je připevněný zespodu ke středovému dílu. Původní koncept počítal s nastavitelným posuvem DPS s akumulátory pro vyrovnání těžiště demonstrátoru. Z hlediska složitosti návrhu tento koncept nakonec nebyl realizován. Finální verze (vpravo) opravila chybu v návrhu předchozí verze (chybné odebrání pro šroub k upevnění DPS).

## 3.2 Výběr materiálů

Při výběru materiálů pro 3D tisk podvozku bylo zapotřebí zvážit několik faktorů. Bylo v plánu vytisknout i pneumatiky a pružiny, tudíž jeden z materiálů by měl být flexibilní a podobný gumě. Pro celkovou konstrukci by však pouze flexibilní materiál nebyl vhodný. Bylo třeba vybrat i nějaký houževnatý materiál.

### 3.2.1 PETG

Pro většinu konstrukce byl vybrán materiál PETG. Tento materiál vyniká svou houževnatostí, nízkou cenou a dostupností. Rovněž se snadno tiskne a má velmi malou teplotní roztažnost. Je teplotně odolný a tak akorát pružný. Díky tomu se při namáhání často jen dočasně prohne, ale nepraskne. [23]

PETG má tendenci tzv. "stringovat" (tvořit nechtěné vlásky materiálu při přejezdech tiskové hlavy) a je hygroskopické. Stringování je o to horší, čím více je materiál nasáklý vodou. Je proto dobré PETG uchovávat v suchu, například v boxu se silikagelem.

### 3.2.2 TPE 88

Pro tisk pneumatik a pružin byl použit materiál TPE 88. Tento materiál byl vybrán především s ohledem na aplikaci při tisku pneumatik zejména kvůli jejich přilnavosti. Z dostupných filamentů se povrch výtisků z TPE 88 zdál být nejvíce podobný gumě. Filament skvěle tlumí vibrace a je mimo jiné vysoce odolný vůči tlaku a nárazu. [24] Stejně jako PETG má tendenci stringovat a je ještě více hygroskopický.

Tento materiál byl náročnější z hlediska nastavení tisku než PETG. První vrstva výtisku přilne ke kvalitnímu lepidlu pro flexibilní filamenty určenému, nicméně nejvíce podařených výtisků bylo dosaženo za použití klasické průhledné polypropylenové lepicí pásky nalepené na tiskové podložce. Výtisky je dobré z této pásky odlepovat ještě než výtisk vychladne, po vychladnutí se páska snadněji trhá a nelze ji ze spodní strany výtisku snadným způsobem sundat. Pro úspěšný tisk bylo rovněž nutné snížit přítlak podávacích koleček extruderu, zpomalit rychlost tisku a celkově odladit tiskový profil filamentu. Rozdíl v kvalitě jednoho z prvních dokončených výtisků a konečného tisku pružiny je možné pozorovat na Obr. 3-8. Dalším rozdílem vůči použitému PETG je trojnásobná cena za kilogram.

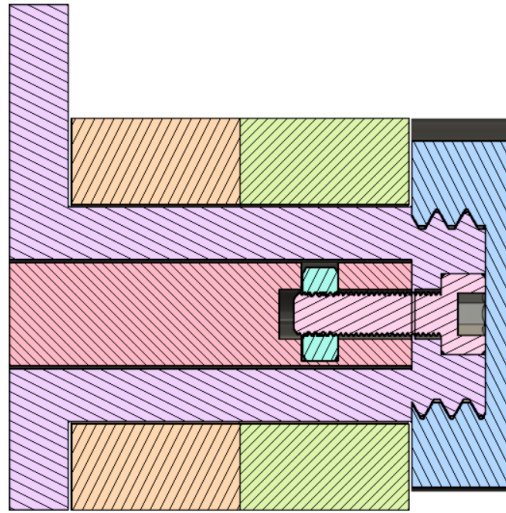


Obr. 3-8: Rozdíl kvality 3D tisku změnou nastavení tiskového profilu

## 3.3 Vlastnosti modelu z hlediska 3D tisku

Nejvíce namáhaným pevným 3D tištěným dílem je s velkou pravděpodobností rameno zavěšení. Z hlediska 3D tisku je tento díl orientován tak, aby podstava válce,

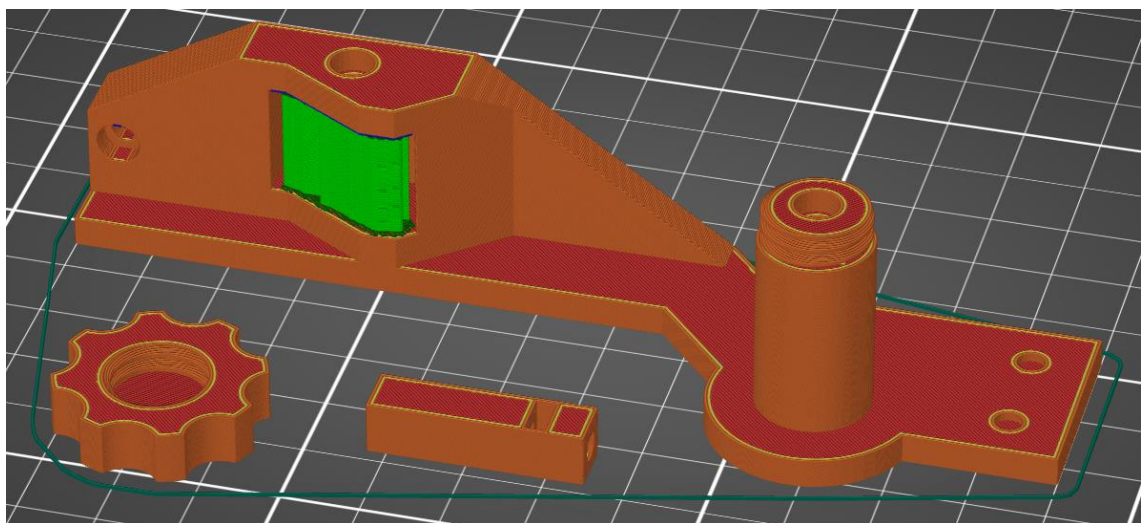
který tvoří kloub pro otáčení pouzdra s motorem, byla vodorovná s tiskovou podložkou 3D tiskárny (Obr. 3-10), a to z důvodu přesnějšího tisku kružnic v rovině tiskové podložky. Výsledkem je tedy relativně přesný válec kloubu ramene s použitelným závitem.



**Obr. 3-9: Řez osou otáčení zavěšeného pouzdra s motorem**

Na Obr. 3-9 je fialovou barvou znázorněn řez ramenem zavěšení, růžová barva reprezentuje výztuhu, modrá barva značí řez víčkem se závitem a oranžová se zelenou díly, ve kterých je uchycen motor.

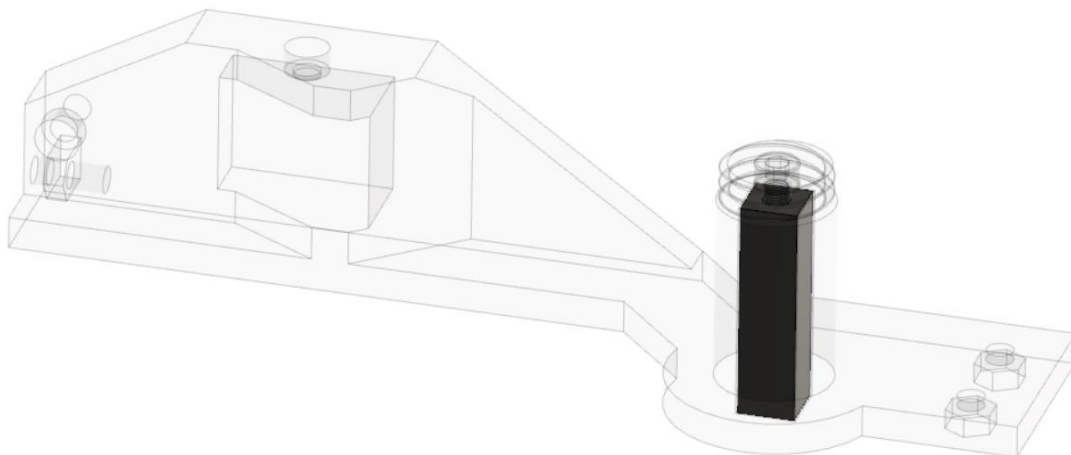
Jednou z možností, jak ovlivnit pevnost 3D tištěného dílu, je jeho orientace vůči tiskové podložce. Důvodem je samotná technologie 3D tisku. Tenké vrstvy (v případě tohoto modelu 0,15 případně 0,2 mm) nanášené na sebe, mají za úkol přilnout jedna na druhou. Tuto adhezi i v rámci jednoho modelu je možné ovlivnit řadou parametrů od výběru filamentu, tiskárny či nastavení tisku. I přes optimalizaci je výtisk nejslabší v místě adheze vrstev (záleží ovšem i na ploše, kterou se jednotlivé vrstvy dotýkají).



**Obr. 3-10: Orientace ramene zavěšení vůči tiskové podložce**



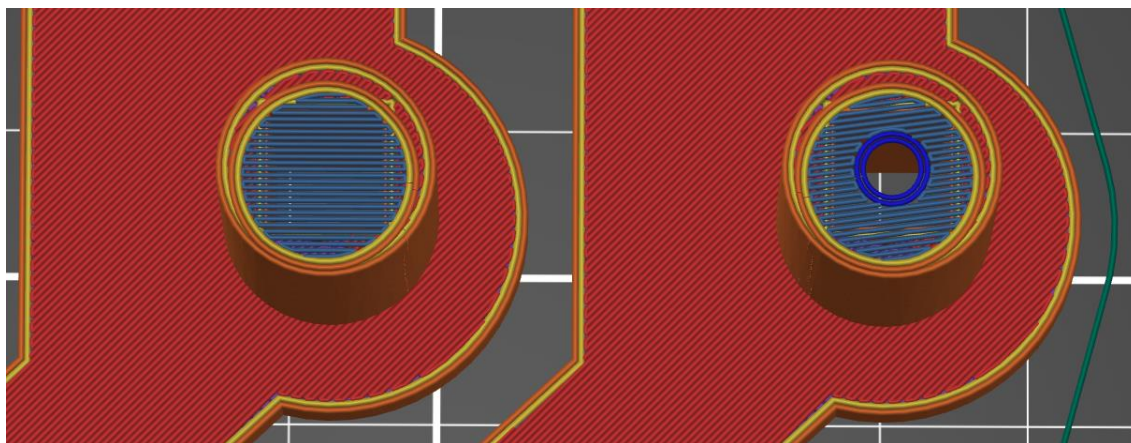
Adheze vrstev v rameni zavěšení je tedy značně namáhána. A i když filament PETG vyniká dobrou přilnavostí vrstev [23], byla navržena výztuha. Tuto výztuhu tvoří hranol vytištěný tak, aby jeho orientace na podložce tiskárny byla kolmá s orientací tisku ramene (Obr. 3-10). Po umístění výztuhy do ramene (Obr. 3-11) je docíleno namáhání výztuhy kolmo vůči tištěným vrstvám, a tím je zvýšena pevnost ramene.



**Obr. 3-11: Umístění výztuhy uvnitř ramene zavěšení**

Model demonstrátoru je navržen tak, aby jeho jednotlivé díly bylo možné vytisknout na 3D tiskárně bez podpěr. Pouze při tisku ramen zavěšení je z estetických důvodů lepší použít podpěry v oblasti uchycení odpružení (Obr. 3-10).

Pro usnadnění tisku a eliminaci podpěr jsou díry pro šroubky, které by běžně vyžadovaly podpěry, zaslepeny. Při modelování byl těmto díram přidán tenký (0,2 mm) válec materiálu. Tiskárna tedy v dané vrstvě, ve které by běžně tiskla první vrstvu tvořící díru, vrstvu vyplní, jako by tam žádná díra nebyla a v dalších vrstvách už díru vykreslí.

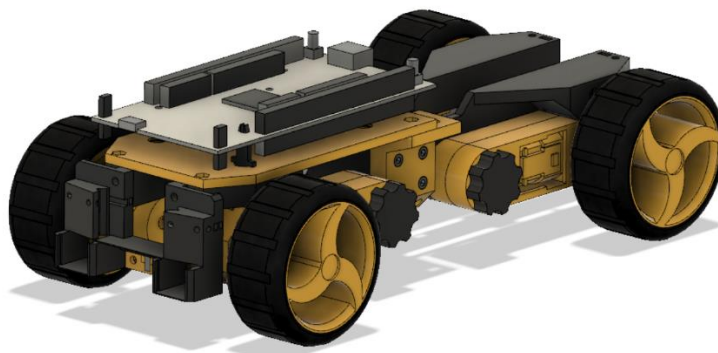


**Obr. 3-12: Náhled na tisk první vrstvy tvořící díru s a bez zaslepení**

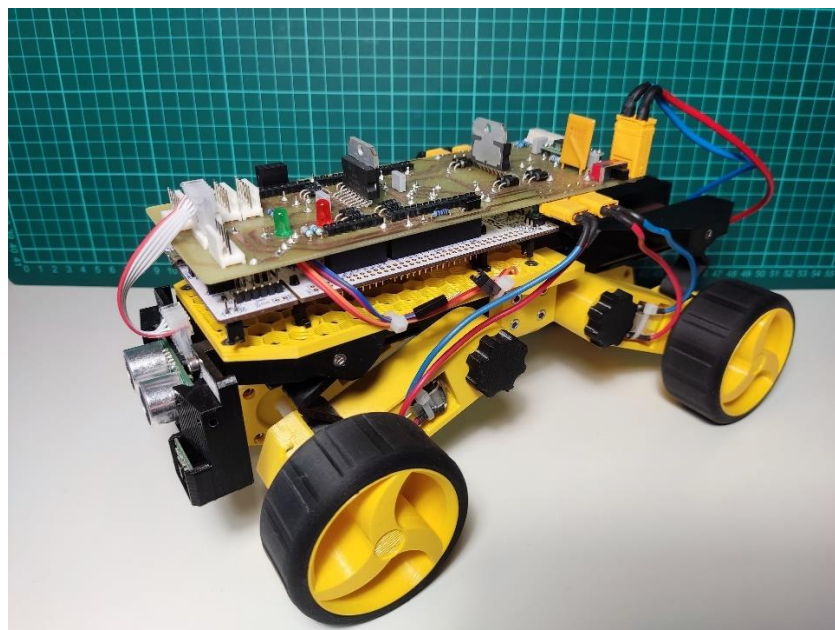
Jelikož 3D tiskárna je schopná přemostění tzv. "bridging" (tisk "do vzduchu" bez použití podpěr na krátké vzdálenosti za předpokladu, že se má tisknutý filament o co opřít na obou stranách "mostu") dokáže díru vytisknout i bez podpěr. Tenké zaslepení děr lze po vytištění snadno odstranit. V případě děr pro matice je výhodnější nejprve vložit příslušnou matici do dílu a až poté zaslepení protrhnout například šroubovákem.



**Obr. 3-13: Výchozí model demonstrátoru**



**Obr. 3-14: Finální model demonstrátoru**

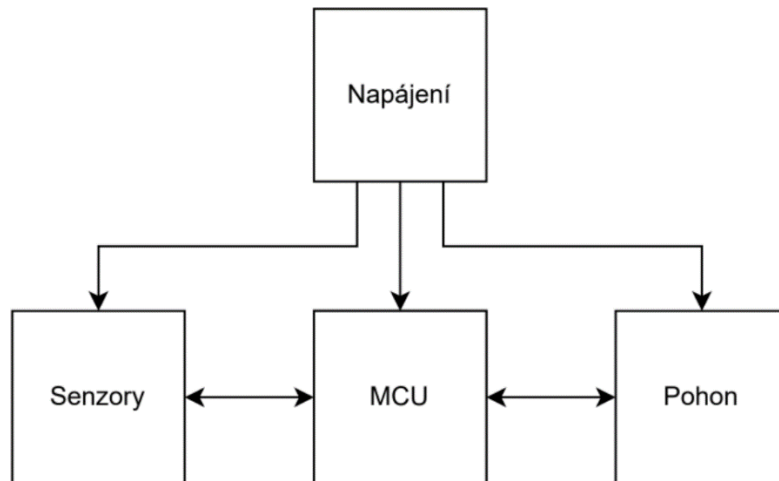


**Obr. 3-15: Fotografie reálného demonstrátoru**

### 3.4 Koncept elektroniky demonstrátoru

Základem elektroniky demonstrátoru (Obr. 3-15) je mikrokontrolér od firmy ST, na kterém je umístěn shield propojující všechny periferie. Napájení je řešeno pomocí sériově zapojených Li-Ion článků typu 18650. Pro aktivní bezpečnostní prvky jsou vybrány senzory vzdálenosti. O pohon se stará čtveřice DC motorů řízených H můstky.

Výběrem elektroniky pro demonstrátor se zabývá kapitola 4. Hardware i software je podrobněji popsán v kapitole 5.



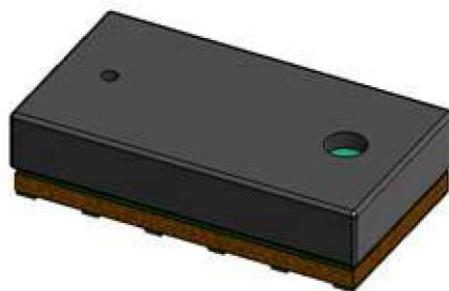
Obr. 3-16: Základní blokové schéma elektroniky demonstrátoru

## 4. VÝBĚR ELEKTRONIKY PRO ZMENŠENÝ MODEL

Pro implementaci do zmenšeného modelu se jako nejlépe implementovatelný aktivní bezpečnostní systém jeví monitorování vzdáleností objektů v okolí modelu. Pro tento účel byly vybrány čtyři druhy vzdálenostních senzorů: VL53L0X viz 4.1, VL53L1X viz 4.2, US-100 viz 4.3 a RPLIDAR A1M8 viz 4.4. Tyto senzory byly vybrány mimo jiné z důvodů vhodných měřitelných vzdáleností a přesnosti vzhledem k velikosti modelu, dobré cenové dostupnosti a rychlosti měření.

### 4.1 Senzor vzdálenosti VL53L0X

Senzor VL53L0X (Obr. 4-1) patří do nové generace optických senzorů Time-of-Flight. Senzor je umístěn ve velmi malém pouzdře a umožňuje přesné měření do 2 m neohledně na odrazivost detekovaného předmětu. [1]



Obr. 4-1: Senzor vzdálenosti VL53L0X [1]

#### 4.1.1 Vlastnosti senzoru VL53L0X

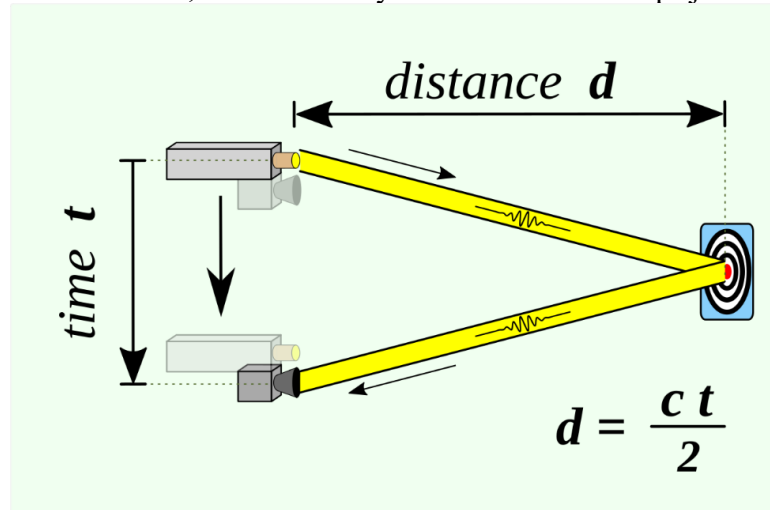
Tabulka 4-1: Vlastnosti senzoru VL53L0X [1]

Vlastnost	Detail
Pouzdro	LGA12
Rozměry	4,40 × 2,40 × 1,00 mm
Provozní napětí	2,6 až 3,5 V
Provozní teplota	-20 až 70 °C
Infračervený zářič	940 nm, Class 1 VCSEL eye-safe
Měřený úhel (FoV)	25 °
I <sup>2</sup> C	až 400 kHz (FAST mode) Adresa: 0x52

#### 4.1.2 Princip senzorů Time-of-Flight

Na rozdíl od senzorů používajících IR technologii, které měří sílu signálu a mohou být tedy ovlivněny odrazivostí měřeného objektu, senzory Time-of-flight měří vzdálenost na základě doby, po kterou vyslaným fotonům trvá cesta k nejbližšímu objektu a odraz

zpět, což umožňuje přesné měření neohledě na odrazivost a barvu povrchu měřeného objektu (i přes to se může stát, že se odražený svazek nedostane k přijímači). [2]



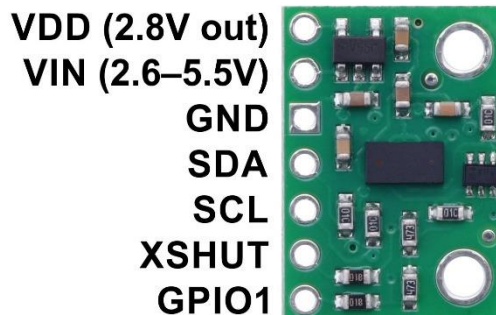
Obr. 4-2: Princip senzoru Time-of-Flight [3]

### 4.1.3 Modul se senzorem VL53L0X

Velikost senzoru, jeho napájení i pouzdro dělá sensor obtížně využitelný samotný v amatérských podmínkách. Je proto dobré využít modul senzoru s přidanými součástkami. Modul Pololu 2490 obsahuje low-dropout lineární napěťový regulátor, který zaručí napájení 2,8 V pro sensor při napájecím napětí modulu od 2,6 V do 5,5 V. Výstup regulátoru je vyveden k pinu VDD a je schopen dodat až 150 mA externí zátěži. Modul také obsahuje převodník úrovní, který převádí I<sup>2</sup>C na stejnou napěťovou úroveň, jako je napájecí napětí. Piny modulu jsou standardní rozteče kompatibilní s nepájivým polem. [4]

#### Specifikace modulu [1]:

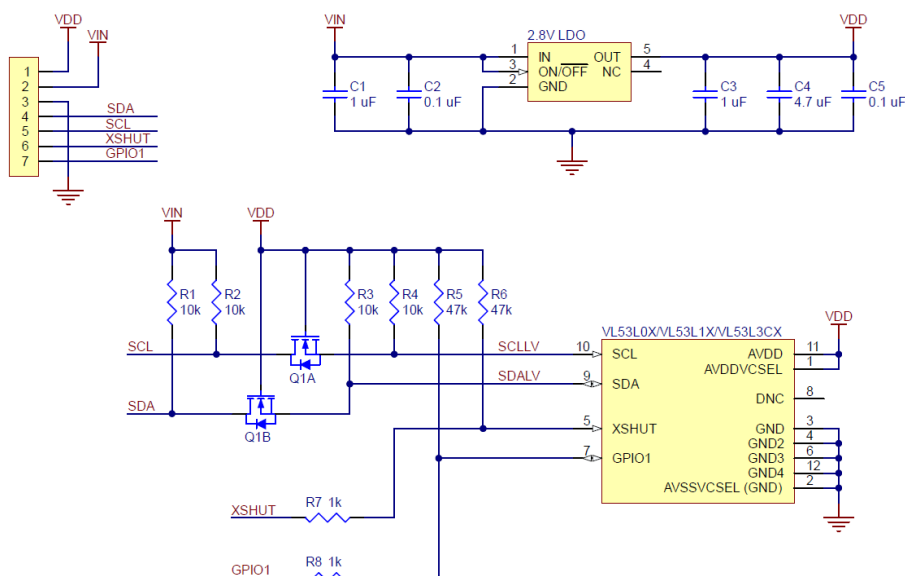
- rozměry: 13 × 18 × 2 mm;
- hmotnost: 0,5 g (bez pinů pro nepájivé pole);
- napájecí napětí: 2,6 až 5,5 V;
- typický odběr proudu během měření: 10 mA (záleží na nastavení, měřeném objektu a prostředí);
- špičkový odběr až 40 mA;
- výstupní formát dat (I<sup>2</sup>C): 16-bit změřená vzdálenost [mm];
- maximální měřitelná vzdálenost: 2 m.



Obr. 4-3: Modul Pololu 2490 s popisem pinů 50 [4]

**Tabulka 4-2: Popis pinů modulu Pololu 2490 [4]**

Pin	Popis
VDD	Výstup regulátoru 2,8 V. Téměř 150 mA je možné dodat do externí zátěže. Je možné obejít interní regulátor a na tento pin přivést externí 2,8 V napájení (VIN musí být v tomto případě odpojen).
VIN	Napájecí pin (vstupní napětí od 2,6 V do 5,5 V). Velikost napájecího napětí určuje logickou úroveň SCL a SDA.
GND	Zem (0 V). I <sup>2</sup> C zdroj signálu musí sdílet zem s tímto modulem.
SDA	I <sup>2</sup> C datový pin s převedenou úrovní log. 1 je VIN, log. 0 je 0 V
SCL	I <sup>2</sup> C hodinový pin s převedenou úrovní log. 1 je VIN, log. 0 je 0 V
XSHUT	Tento pin je pull-up rezistorem nastaven do VDD úrovně, přivedením log. 0 na tento pin přivedeme sensor do režimu hardware standby. Tento vstup není připojen na převodník úrovní.
GPIO1	Programovatelný pin pro přerušení s VDD logickou úrovní. Tento vstup není připojen na převodník úrovní.



**Obr. 4-4: Schéma zapojení modulu Pololu 2490 [4]**

#### 4.1.4 Režimy senzoru VL53L0X

Komunikace se senzorem VL53L0X probíhá pomocí API od ST [5]. Jde o řadu C funkcí, které se starají o low-level připojení. Existují ovšem i knihovny, díky kterým je nastavení a čtení dat přes I<sup>2</sup>C jednodušší. [4]

##### Měřicí módy:

- Jedno měření

Měření se provede pouze jednou po zavolání API funkce. Systém se vrátí do režimu SW standby automaticky.

- **Kontinuální měření**  
Měření se provádí kontinuálně po zavolání API funkce. Když je měření dokončeno, další měření začne neprodleně. Uživatel musí měření zastavit pro návrat do režimu SW standby. Poslední měření je dokončeno před zastavením.
- **Časované měření**  
Měření se provádí kontinuálně po zavolání API funkce. Když je měření dokončeno, další měření začne až po uživatelem nastaveném čase. Toto zpoždění se nastavuje API funkcí. [9]

### Měřicí profily

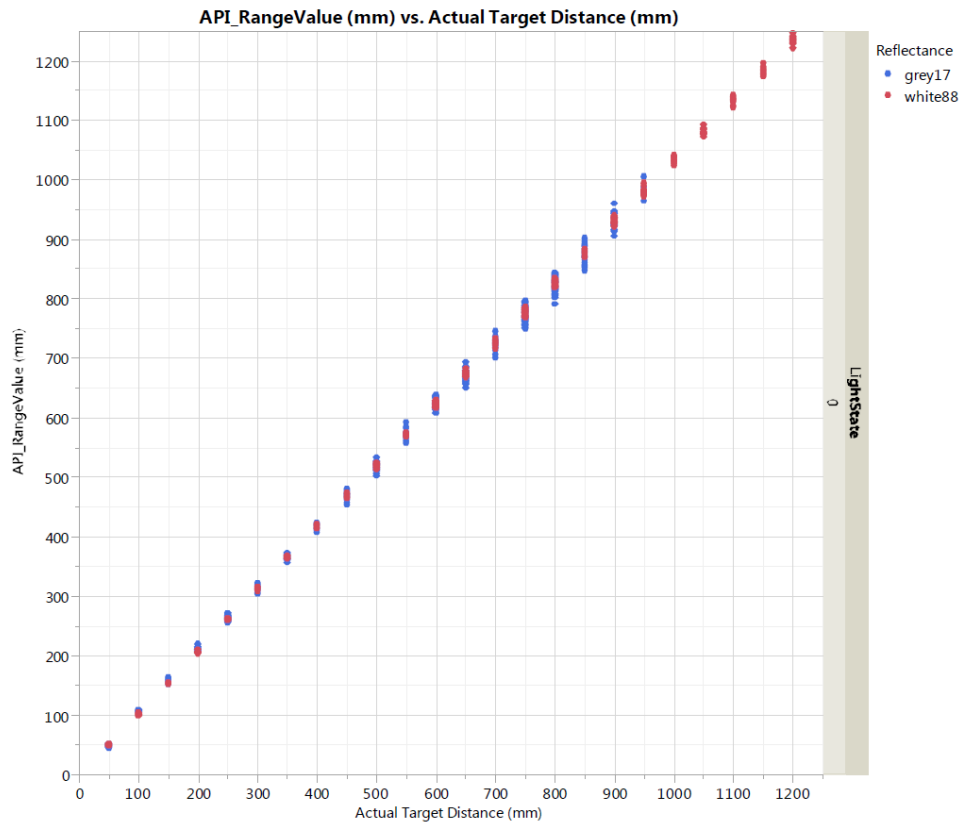
Měřicí profily z příkladů v API uživatelském manuálu popisuje Tabulka 4-3. Uživatel si také může vytvořit vlastní měřicí profil na základě požadavků na použití.

**Tabulka 4-3: Měřicí profily z API [5]**

	Čas jednoho měření [ms]	Typická maximální vzdálenost a přesnost	Typické použití
<b>Výchozí režim</b>	30	1,2 m; přesnost viz Tabulka 4-4	Standardní
<b>Vysoká přesnost</b>	200	1,2 m; přesnost < ±3 %	Přesné měření
<b>Velká vzdálenost</b>	33	2 m; přesnost viz Tabulka 4-4	Měření dlouhých vzdáleností, pouze pro tmavé prostředí
<b>Vysoká rychlost</b>	20	1,2 m; přesnost ±5 %	Vysokorychlostní měření, kde není přesnost prioritou

**Tabulka 4-4: Přesnost měření udávána výrobcem [1]**

	Měřeno v budově			Měřeno venku		
	Vzdálenost	33 ms	66 ms	Vzdálenost	33 ms	66 ms
<b>Bílý předmět (88 %)</b>	120 cm	4 %	3 %	60 cm	7 %	6 %
<b>Šedý předmět (17 %)</b>	70 cm	7 %	6 %	40 cm	12 %	9 %



**Obr. 4-5: Graf naměřené vzdálenosti proti skutečné (výchozí režim měření) [1]**

## 4.2 Senzor vzdálenosti VL53L1X

Senzor vzdálenosti (Obr. 4-6) patří do nové generace optických senzorů Time-of-Flight. Senzor patří mezi nejmenší ToF senzory na trhu s přesným měřením do 4 m a rychlou měřicí frekvencí 50 Hz. [7]



**Obr. 4-6: Senzor vzdálenosti VL53L1X [7]**



## 4.2.1 Vlastnosti senzoru VL53L1X

Tabulka 4-5: Vlastnosti senzoru VL53L1X [7]

Vlastnost	Detail
Pouzdro	Optical LGA12
Rozměry	4,90 × 2,50 × 1,56 mm
Provozní napětí	2,6 až 3,5 V
Provozní teplota	-20 až 85 °C
Infračervený zářič	940 nm, Class 1 VCSEL eye-safe
Měřený úhel (FoV)	Programovatelný od 15 do 27 °
I <sup>2</sup> C	až 400 kHz (FAST mode) Programovatelná adresa (defaultně 0x52)

## 4.2.2 Princip měřicí metody senzoru VL53L1X

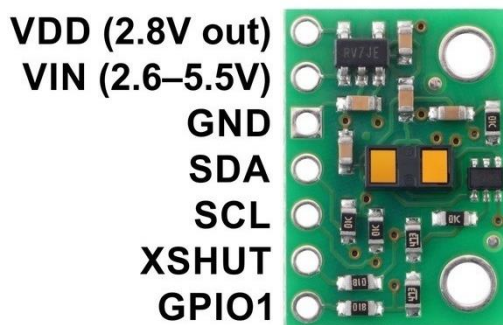
Jedná se o stejný princip metody Time-of-Flight (4.1.2) jako u senzoru VL53L1X.

## 4.2.3 Modul se senzorem VL53L1X

Obdobně jako u senzoru VL53L0X (4.1.3) dělají rozměry, pouzdro a napájení senzor VL53L1X obtížně využitelný samotný v amatérských podmínkách. Je proto dobré využít modul senzoru s přidávanými součástkami. Modul Pololu 3415 osazený senzorem VL53L1X má stejné zapojení jako modul Pololu 2490 osazený VL53L0X (Obr. 4-4).

### Specifikace modulu [8]:

- rozměry: 13 × 18 × 2 mm;
- hmotnost: 0,5 g (bez pinů pro nepájivé pole);
- napájecí napětí: 2,6 až 5,5 V;
- typický odběr proudu během měření: 15 mA (záleží na nastavení, měřeném objektu a prostředí);
- špičkový odběr až 40 mA;
- rychlé a přesné měření se třemi vzdálenostními módy (Tabulka 4-6);
- minimální měřitelná vzdálenost: 4 cm (předměty pod tuto vzdálenost jsou detekovány, ale měření není přesné);
- detektor: 16x16 SPAD s integrovanou čočkou;
- konfigurovatelná detekce přerušení pro autonomní detekci přítomnosti objektu (4.2.4);
- výstupní formát dat (I<sup>2</sup>C): 16-bit změřená vzdálenost (v mm).



Obr. 4-7: Modul Pololu 3415 s popisem pinů [8]

Popis pinů viz Tabulka 4-2.

#### 4.2.4 Režimy senzoru VL53L1X

Komunikace se senzorem VL53L1X probíhá obdobně jako u VL53L0X pomocí API od ST. [9]

##### Vzdálenostní módy

Vzdálenostní módy umožňují optimalizovat vnitřní nastavení za účelem nejlepšího měření v závislosti na aplikaci a osvětlení, ve kterém je měření prováděno. [9]

Tabulka 4-6: vzdálenostní módy [9]

Vzdálenostní mód	Maximální vzdálenost	Poznámka
Krátká vzdálenost	až 1,3 m	Lepší odolnost vůči okolnímu osvětlení.
Střední vzdálenost	až 3 m	
Velká vzdálenost	až 4 m	Maximální měřitelná vzdálenost.

Tabulka 4-7: Přesnost měření v tmavém prostředí [7]

Parametr	Odrazivost měřeného objektu	Typická hodnota (mód velké vzdálenosti)	Typická hodnota (mód krátké vzdálenosti)
Maximální vzdálenost [cm]	Bílý 88 %	360	130
	Šedý 54 %	340	130
	Šedý 17 %	170	130
Chyba měření [mm]		±20	

## **Prahové měřicí módy**

Senzor VL53L1X může být nakonfigurován prahovými měřicími módy. Naměřená data jsou poté senzorem odeslána, pokud jsou splněna přednastavená kritéria, kterými jsou [9]:

- Nižší než určitá vzdálenost:
  - Pokud je vzdálenost objektu větší než minimální nastavená vzdálenost, nebo nebyl nalezen žádný měřený objekt, nedojde k odeslání dat.
  - Pokud je vzdálenost objektu menší než minimální nastavená vzdálenost a byl nalezen měřený objekt, dojde k odeslání dat.
- Větší než určitá vzdálenost:
  - Pokud je vzdálenost objektu menší než maximální nastavená vzdálenost, nebo nebyl nalezen žádný měřený objekt, nedojde k odeslání dat.
  - Pokud je vzdálenost objektu větší než maximální nastavená vzdálenost a byl nalezen měřený objekt, dojde k odeslání dat.
- Mimo určitý rozsah vzdáleností:
  - Pokud minimální nastavená vzdálenost je menší než měřená vzdálenost a zároveň měřená vzdálenost je menší než maximální nastavená vzdálenost, nedojde k odeslání dat.
  - Pokud minimální nastavená vzdálenost je větší než měřená vzdálenost a zároveň měřená vzdálenost je větší než maximální nastavená vzdálenost, dojde k odeslání dat.
- V určitém rozsahu vzdáleností:
  - Pokud minimální nastavená vzdálenost je větší než měřená vzdálenost a zároveň měřená vzdálenost je větší než maximální nastavená vzdálenost, nedojde k odeslání dat.
  - Pokud minimální nastavená vzdálenost je menší než měřená vzdálenost a zároveň měřená vzdálenost je menší než maximální nastavená vzdálenost, dojde k odeslání dat.
- Žádný měřený objekt nenalezen:
  - Standardně, když není detekován žádný měřený objekt, nedojde k odeslání dat. Použitím módu žádný objekt nenalezen dojde k povolení přerušení, když není detekován žádný předmět.

## **Nastavení ROI detektoru**

Detektor ve výchozím nastavení využívá pole  $16 \times 16$  SPAD (pixely), které pokrývá maximální měřený úhel (FoV). Je možné naprogramovat menší ROI (využívané pixely) s menším počtem SPAD za účelem zmenšení měřeného úhlu. ROI se definuje pomocí dvou bodů vymezujících obdélník, či čtverec (levý horní a pravý spodní bod). Minimální velikost ROI je  $4 \times 4$ . [9]

**Tabulka 4-8: Ovlivnění měření v tmavém prostředí změnou ROI [7]**

Parametr	Odrazivost měřeného objektu	16 × 16	8 × 8	4 × 4
Maximální vzdálenost [cm]	Bílý 88 %	360	308	170
	Šedý 54 %	340	254	143
	Šedý 17 %	170	119	45
Měřený úhel (FoV) [°]		27	20	15
Chyba měření [mm]		±20	±20	±20

### 4.3 Senzor vzdálenosti US-100

Ultrazvukový senzor vzdálenosti US-100 (Obr. 4-8) je podobný populárnímu ultrazvukovému senzoru HC-SR04. Přestože senzory vypadají stejně, US-100 má několik vylepšení (např. teplotní kompenzaci). Pro komunikaci se senzorem je možné využít jak způsob, který využívá HC-SR04 (4.3.2), tak sériový UART. [11]



**Obr. 4-8: Senzor vzdálenosti US-100 [10]**

#### 4.3.1 Vlastnosti senzoru US-100

**Tabulka 4-9: Vlastnosti senzoru US-100 [11], [12]**

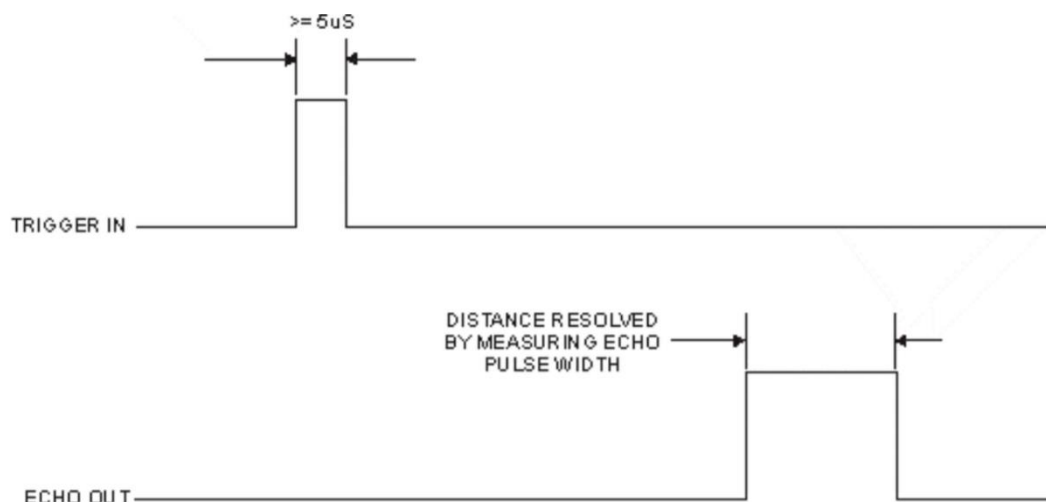
Vlastnost	Detail
Rozměry	45 × 20 × 15 mm
Provozní a logické napětí	2,4 až 5,5 V
Klidový proud	< 2 mA
Provozní teplota	-20 až 70 °C
Měřitelná vzdálenost	2 až 450 cm
Přesnost měření	0,3 cm + 1 %
Měřený úhel (FoV)	< 15°
Frekvence	40 kHz
UART	9600 baud 8N1, (8 data bitů, bez parity, 1 stop bit)

### 4.3.2 Principy měření senzorem US-100

Na zadní straně senzoru US-100 se nachází zkratovací propojka. Je-li tato propojka odpojena, senzor bude komunikovat stejnou metodou jako senzor HC-SR04. Je-li tato propojka zapojena, senzor bude komunikovat pomocí UARTu. [11]

#### Princip měřící metody senzoru HC-SR04

Princip metody spočívá v nastavení log. 1 na trigger vstup modulu po dobu větší nebo rovnu  $5 \mu\text{s}$ . Ultrazvukový vysílač na základě toho vyšle vysokofrekvenční ultrazvukový signál, který se odrazí od měřeného objektu a vrátí se zpět. Ultrazvukový přijímač nastaví na log. 1 výstupní echo pin, jakmile začne přijímat odražený signál. Po dokončení příjmu nastaví echo pin znovu na log. 0. Z šířky pulzu na výstupním echo pinu je možné spočítat vzdálenost měřeného objektu. Šířka pulzu větší než 60 ms indikuje měření mimo měřitelný rozsah. [13]



Obr. 4-9: Časový diagram pulzů při měření vzdálenosti senzorem US-100 [13]

Výpočet vzdálenosti měřeného objektu

$$d = \frac{t \cdot v}{2} [\text{m}], \quad (1)$$

kde  $d$  je vzdálenost měřeného objektu,  $t$  je šířka pulzu [s],  $v$  je rychlost zvuku [m/s].

[13]

#### Teplotní kompenzace

Reálná rychlost zvuku závisí na několika faktorech. Jedním z nich je teplota, která na ni má nejzásadnější vliv.

Rychlost zvuku v suchém prostředí

$$v = 331,4 + 0,6 \cdot T [\text{m/s}], \quad (2)$$

kde  $T$  je teplota prostředí [ $^{\circ}\text{C}$ ]. [13]

Jednou z vlastností US-100 je integrovaná teplotní kompenzace, která z předchozí rovnice odstraní teplotní závislost. Výpočet vzdálenosti měřeného objektu se tak zjednoduší na

$$d = t \cdot 165,7 \text{ [m]}, \quad (3)$$

kde  $t$  je šířka pulzu [s]. [13]

#### **Způsob měření přes UART**

Při komunikaci pomocí UARTu (9600 baud 8N1) pošleme z řídicí jednotky (mikrokontrolér) hodnotu 0x55. Senzor zpátky pošle dva bajty, které odpovídají měřené vzdálenosti v milimetrech:

$$d = A \cdot 256 + B \text{ [mm]}, \quad (4)$$

kde  $d$  je měřená vzdálenost,  $A$  je první přijatý bajt,  $B$  je druhý přijatý bajt. [14]

Pošleme-li hodnotu 0x50, senzor zpátky pošle bajt odpovídající změřené teplotě ve stupních Celsia

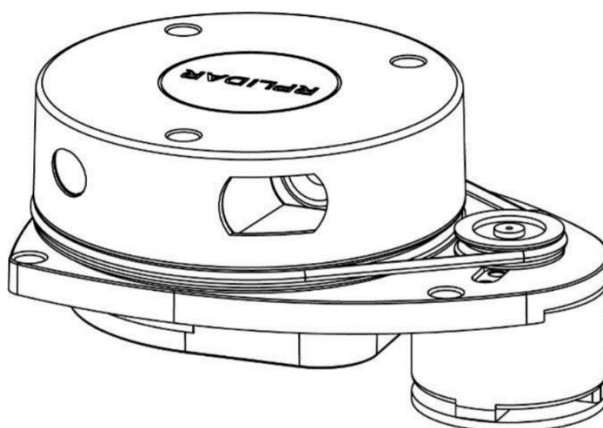
$$T = C - 45 \text{ [°C]}, \quad (5)$$

kde  $T$  je měřená teplota,  $C$  je přijatý bajt. [14]

Tato metoda je výhodná například v případě použití senzoru s počítačem připojeným přes sériový převodník nebo se zařízením, které nezvládne speciální časování potřebné pro měřící metodu HC-SR04.

## **4.4 Senzor vzdálenosti RPLIDAR A1M8**

RPLIDAR A1 je levný 360° 2D laserový skener (LIDAR) od firmy Slamtec. Tento senzor zvládne měřit v okruhu 360 ° do vzdálenosti 6 m. LIDAR využívá laserový triangulační měřicí systém, který rotuje, čímž měří vzdálenosti objektů v okolí senzoru. Skenovací frekvence senzoru je 5,5 Hz, kdy vzorkuje 1450 bodů, každé otočení může být nakonfigurovaná až na 10 Hz. Komunikace se senzorem probíhá přes UART. [15]



**Obr. 4-10: Senzor vzdálenosti RPLIDAR A1M8 [15]**

RPLIDAR A1M8 obsahuje adaptivní systém, který měří rychlost motoru zodpovědného za otáčení senzoru a na základě toho automaticky upravuje frekvenci laserového skeneru. Uživatel může tuto reálnou rychlost zjistit přes UART. Emitovaný laserový paprsek je modulovaný, aby nedocházelo k ovlivnění měření okolním osvětlením. [15]

**Tabulka 4-10: Vlastnosti senzoru vzdálenosti RPLIDAR A1M8 [15]**

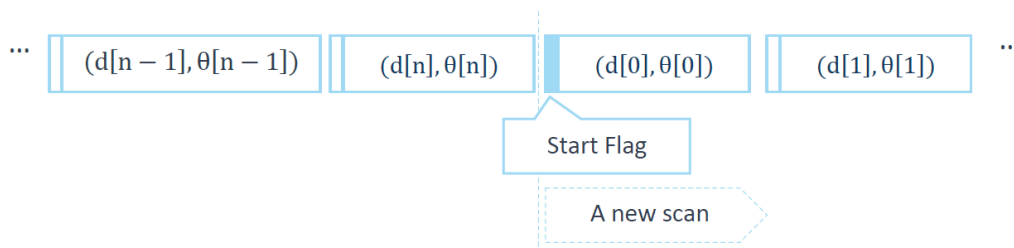
Vlastnost	Detail
<b>Rozměry</b>	97 × 71 × 51 mm
<b>Hmotnost</b>	170 g
<b>Provozní napětí senzoru</b>	4,9 až 5,5 V
<b>Provozní napětí motoru</b>	typ. 5 V max. 9 V
<b>Proud pro senzor</b>	start typ. 500 mA max. 600 mA režim spánku: typ. 80 mA max. 100 mA režim měření: typ. 300 mA max. 350 mA
<b>Proud pro motor</b>	typ. 100 mA
<b>Provozní teplota</b>	0 až 40 °C
<b>Laserový zářič</b>	typ. 785 nm, Class I laser safety standard
<b>Měřený úhel</b>	0 až 360 °
<b>UART</b>	115200 baudů 8N1

#### 4.4.1 Komunikace se senzorem RPLIDAR A1M8

Při měřicím procesu RPLIDAR posílá na výstup data (3,3 V-TTL sériový port UART). Každý měřený vzorek obsahuje informace, viz [15].

**Tabulka 4-11: Data v měřeném vzorku senzoru RPLIDAR A1M8 [15]**

Posílaná data	Popis
Vzdálenost [mm]	Aktuálně měřená vzdálenost mezi RPLIDAREm a měřeným objektem
Úhel natočení [°]	Aktuální úhel natočení rotačního jádra
Kvalita [stupeň kvality]	Kvalita měření
Počáteční znak [Boolean]	Počáteční znak nového měření



**Obr. 4-11: Bloky měřených dat senzoru RPLIDAR A1M8 [15]**

RPLIDAR posílá měřené vzorky kontinuálně podle Obr. 4-11. Uživatel může posílání výstupních dat zastavit příkazem. Při použití vyšší vzorkovací frekvence než 4000 bodů se datová struktura odesílaných dat liší. Pro získání více informací datasheet často navádí ke kontaktování výrobce SLAMTEC. [15]

#### 4.4.2 RPLIDAR A1M8 vývojový kit

Vývojový kit obsahuje mimo RPLIDARu integrovaný obvod pro ovládání motoru (3,3 V), kterým může uživatel nastavit skenovací frekvenci (v rozsahu 2 až 10 Hz) změnou otáček motoru. Uživatel může motor vypnout úplně a snížit tak spotřebu zařízení. Kit obsahuje USB adaptér pro napájení a zároveň pro převod interního UARTu na USB interface. Použitím mikro-USB kabelu je pak možné připojit RPLIDAR přímo k počítači. Po nainstalování ovladače je možné (pomocí demo aplikace Frame\_grabber od Slamtecu) na počítači graficky zobrazit měřené výsledky, případně je uložit pro další zpracování. [16]



## 4.5 Srovnání senzorů vzdálenosti

Tabulka 4-12: Srovnání senzorů vzdálenosti [1], [7], [8], [11], [12], [15]

	VL53L0X (modul)	VL53L1X (modul)	US-100	RPLIDAR A1M8
<b>Rozměry [mm]</b>	13 × 18 × 2	13 × 18 × 2	45 × 20 × 15	97 × 71 × 51
<b>Hmotnost [g]</b>	0,5	0,5	9	170
<b>Provozní napětí [V]</b>	2,6 až 5,5	2,6 až 5,5	2,4 až 5,5	4,9 až 5,5 (motor 5 až 9)
<b>Proud při měření [mA]</b>	10	15	2	300 (+ 100 motor)
<b>Provozní teplota [°C]</b>	-20 až 70	-20 až 85	-20 až 70	0 až 40
<b>Měřitelná vzdálenost [m]</b>	0,03 až 2	0,04 až 4	0,02 až 4,5	0,15 až 6
<b>Měřený úhel [°]</b>	25	Nastavitelný od 15 do 27	<15	0 až 360
<b>Komunikace</b>	I <sup>2</sup> C až 400 kHz	I <sup>2</sup> C až 400 kHz	UART 9600, 8N1 nebo Echo-Trig	UART 115200, 8N1

## 4.6 Výběr ovladače zmenšeného modelu

Demonstrátor je připraven na komunikaci s ovládáním. Autonomní model je vybavený bezpečnostním algoritmem, který by zasáhl do řízení v případě dálkového ovládání člověkem. I bez dálkového ovládání však demonstrátor plní svou funkci.

### Výčet výhod a nevýhod různých druhů dálkového ovládání

#### Počítač

- Výhody:
  - je možné využít dostupné zařízení;
  - není nutné navrhovat ani vyrábět DPS;
  - dostatek výpočetního výkonu;
  - různé možnosti připojení k demonstrátoru (WI-FI, Bluetooth);
  - možnost vizualizace na displeji.
- Nevýhody:
  - nutnost naprogramovat aplikaci pro Windows;
  - velikost.

#### Telefon

- Výhody:
  - je možné využít dostupné zařízení;
  - není nutné navrhovat ani vyrábět DPS;
  - dostatek výpočetního výkonu;

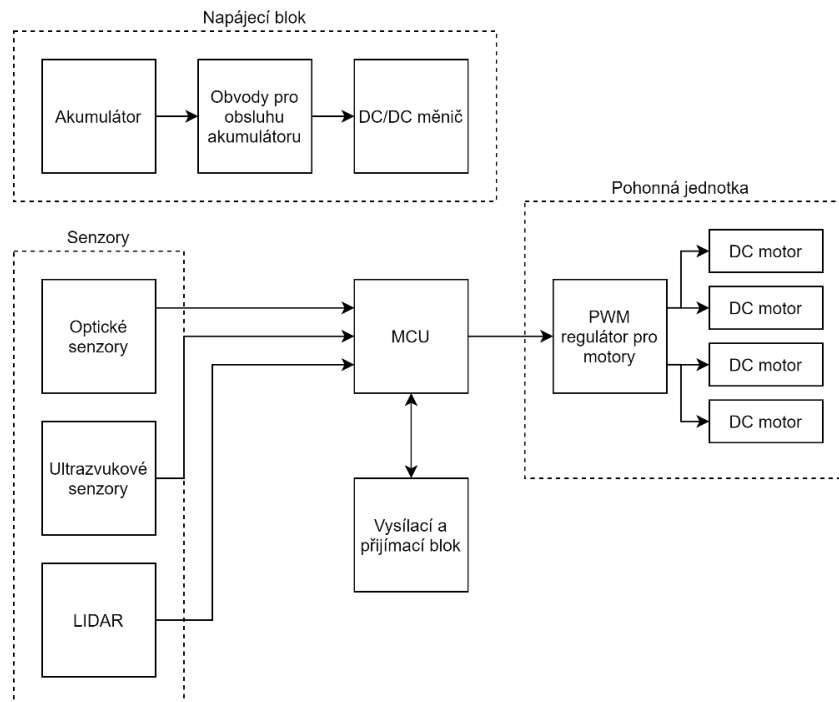
- různé možnosti připojení k demonstrátoru (WI-FI, Bluetooth);
- možnost vizualizace na displeji;
- velikost.
- Nevýhody:
  - nutnost naprogramovat aplikaci pro android;
  - možná nekompatibilita různých android zařízení;
  - nepohodlné ovládání pomocí dotykového displeje.

### **Vlastní návrh ovládání**

- Výhody:
  - dostatek výpočetního výkonu (záleží na použitém mikrokontroléru);
  - možnost vlastního uspořádání;
  - volba použitých součástek (display, joysticky, tlačítka);
  - možnost vizualizace na displeji;
  - velikost;
  - programování možné stejným způsobem jako u demonstrátoru;
  - volba komunikace záleží na použitých komponentech.
- Nevýhody:
  - složitost vlastního řešení.

## 5. HARDWARE A SOFTWARE

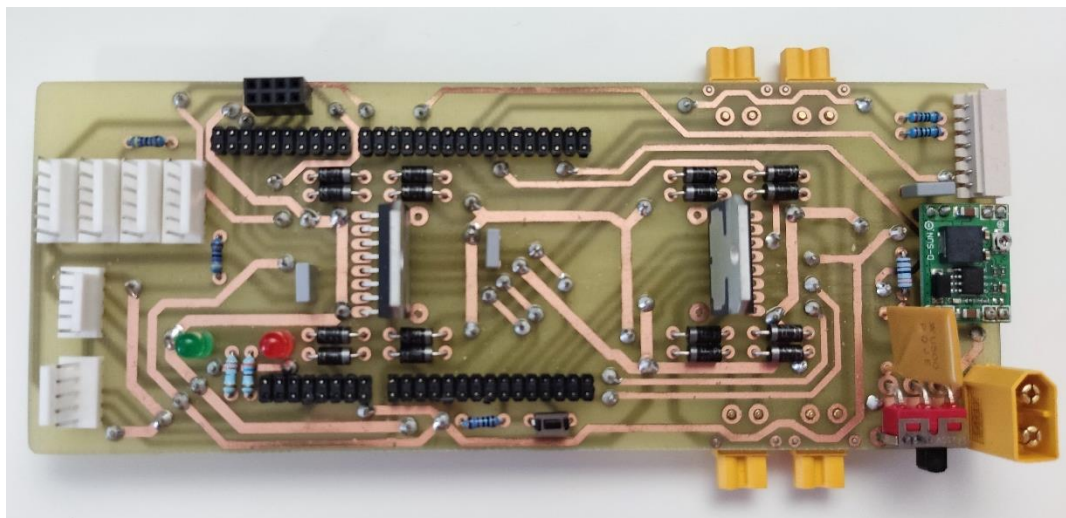
Tato kapitola se zabývá vysvětlením realizace jednotlivých bloků elektroniky demonstrátoru, popisem osazených součástek na DPS a obslužným firmwarem.



Obr. 5-1: Blokové schéma elektroniky demonstrátoru

### 5.1 Popis součástek DPS shieldu

Součástky pro DPS shieldu (Obr. 5-2) a DPS pro akumulátory (Obr. 5-3) byly vybrány především s ohledem na skladovou dostupnost. Drtivá většina součástek byla pořízena v TME a bude tedy použito jejich značení součástek.

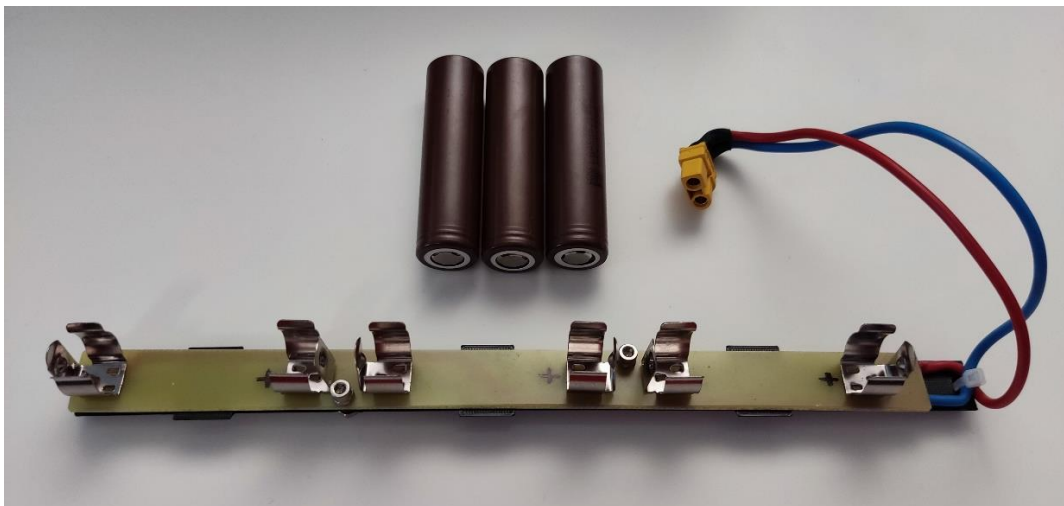


Obr. 5-2: Fotografie DPS shieldu pro Nucleo

### 5.1.1 Napájecí blok

Napájení demonstrátoru zajišťuje trojice Li-Ion článků v sérii typu 18650 (LG-HG2 Obr. 5-3) s maximálním kontinuálním vybíjecím proudem 20 A a nominálním napětím 3,6 V na článek o kapacitě 3000 mAh. Tento zdroj zajišťuje demonstrátoru dostatek energie s velkou rezervou. Jako ochrana akumulátoru je zapojena vratná polymerová pojistka (RUEF500), která propustí 5 A bez omezení a nejpozději při 10 A ochrání následnou elektroniku zvýšením odporu. K určení napětí na akumulátorech a tím pádem ochraně proti podvybití, je na DPS shieldu osazený odporový dělič připojený na AD převodník. Napětí z akumulátorů jde přímo pouze jako napájení pro motory (přes H můstky L298n) a do spínaného zdroje (OKY3504-2 osazený MP1584EN) nastaveného na výstupní napětí 5 V s maximálním výstupním proudem 3 A. Napájecí sekci uzavírá potřeba 3,3 voltů, které zajišťuje stabilizátor na Nucleo desce s maximálním odběrem 500 mA (podle údajů z datasheetů by celkový odběr senzorů a komunikačního modulu neměl přesáhnout cca 170 mA při 3,3 V). O spínání napájení se stará posuvný přepínač (5MS1S102AM6QE) s maximální DC zatížitelností 5 A / 28 V.

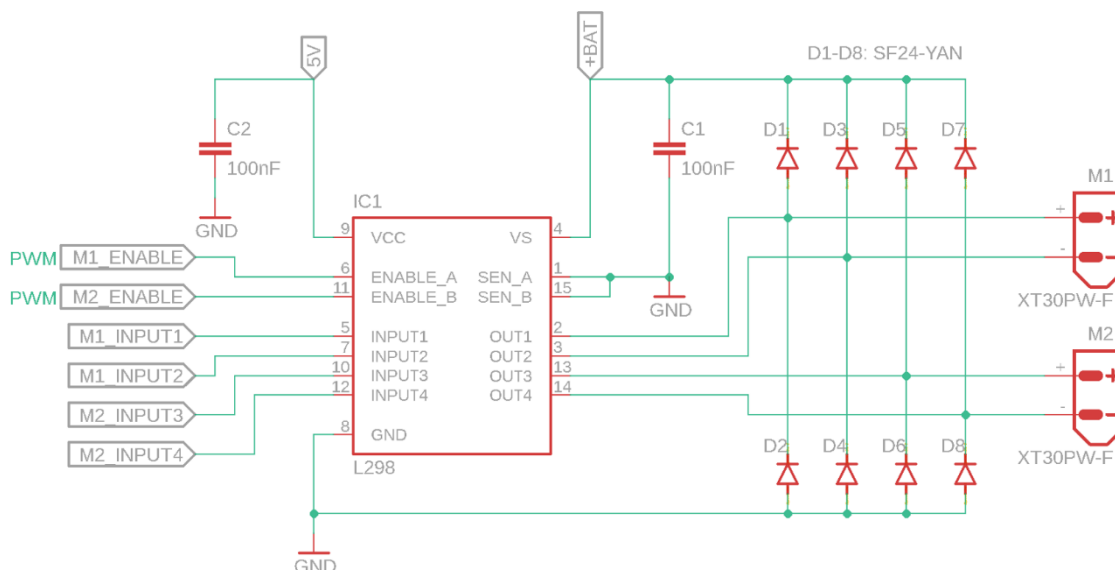
Celkově byl napájecí blok výkonově naddimenzován tak, aby bylo možné v budoucnu pohánět silnější motory. DPS shieldu pro tuto možnost počítá s osazením chladičů k H můstkům.



Obr. 5-3: Fotografie DPS pro akumulátory

### 5.1.2 Pohon demonstrátoru

O pohon demonstrátoru se starají čtyři DC motory (OKY5022) řízené dvěma H můstkami (L298n). Motory jsou zapouzdřené společně s převodovkou (poměr převodu 48:1). Průměr kol demonstrátoru byl zvolen s ohledem na komerčně prodávaná kola k těmto motorům. Technické údaje od prodejců těchto motorů se výrazně liší, zejména informace o rozsahu napájecího napětí a proudovém odběru. TME uvádí pro OKY5022 250 mA pracovní proud, napájecí napětí 4,5 V a moment otáčení max. 78 mNm. Naměřený proudový odběr dosahoval při zatížení 200 až 700 mA (podle míry zatížení), naprázdno pak 97 až 112 mA (pro každý měřený motor jinak). Celé měření bylo provedeno pro napájecí napětí 6 V. Motory zjevně zvládají i napájecí napětí 12 V.



**Obr. 5-4: Schéma zapojení motorů k H můstku L298n**

Schéma zapojení H můstku ilustruje Obr. 5-4. Integrovaný obvod L298n obsahuje dva H můstky, tudíž je schopný obsluhovat dva DC motory současně (případně je možné jeho výstupy zapojit paralelně a zdvojnásobit tak výkon pro jeden DC motor). L298n je řízen dvěma PWM vstupy (ENABLE\_A a ENABLE\_B), které pomocí střídavého signálu určují otáčky daného motoru. Kombinace rozdílných logických úrovní na vstupech pro daný můstek (INPUT1 a INPUT2) rozhoduje, jakým směrem se bude motor (M1) točit. Případně je možné motor shodnou logickou hodnotou těchto vstupů rychle zastavit. Diody D1 až D8 slouží k ochraně můstku při vypnutí motoru. Z důvodů ochrany jsou tu rovněž kondenzátory C1 a C2.

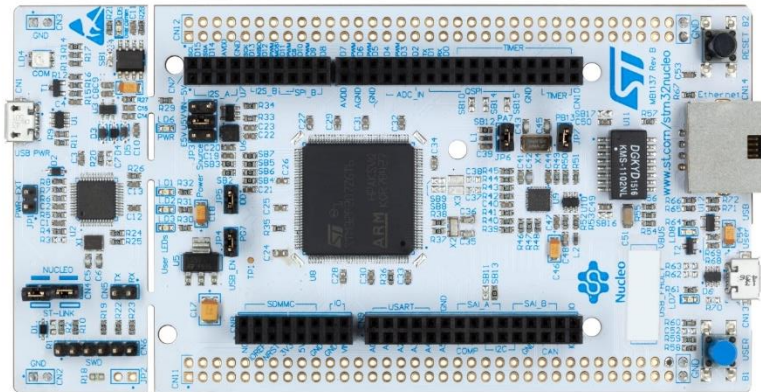
### 5.1.3 Konektory

DPS shieldu je připravena pro připojení čtyř optických senzorů ToF po sběrnici I2C přes konektory (MUSS100-6-C-E) s datovými piny připojenými k pull-up rezistorům (potřebné pull-up rezistory nejsou osazené na Nucleo desce). Dalšími možnými senzory jsou dva ultrazvukové připojené pomocí dvou UART rozhraní přes konektory (MUSS100-5-D-E) a LIDAR připojený rovněž přes svůj UART.

Pro možnou komunikaci s ovládáním je DPS shieldu osazena konektorem pro modul NRF24L01 připojeným k SPI rozhraní (pro případné ovládání a indikaci je DPS shieldu osazena dvěma LED a tlačítkem).

Výkonový napájecí konektor a konektory pro jednotlivé motory jsou z řady XT (napájecí XT60 a pro motory XT30). Konektory jsou rovněž úmyslně naddimenzovány pro možnost silnějších motorů.

## 5.2 Vývojová deska Nucleo



Obr. 5-5: Vývojová deska NUCLEO-F429ZI

Vývojová deska NUCLEO-F429ZI (Obr. 5-5) řídí celý demonstrátor. Tato deska byla vybrána z důvodů dostatečného výkonu, dostatku periférií a skladové dostupnosti. Deska je osazena 32-bit Arm Cortex M4 CPU s 2 MB Flash paměti, 256+4 KB SRAM, frekvencí až 180 MHz, 4x USART, 4x UART, 3x I2C, 6x SPI a 17 timery viz [25]. Vývojová deska umožňuje použití 114 GPIO pinů [26].

Největším objeveným problémem během implementace firmwaru bylo zjištění, že se deska chová (se stejným firmwarem) jinak při napájení z počítače přes ST-LINK a při externím napájení přes pin E5V. Důvodem je pravděpodobně využití jiného hodinového signálu při externím napájení.

## 5.3 Software

Pro tvorbu obslužného firmwaru bylo použito prostředí STM32 CubeIDE (ve verzi 1.4.0).

### 5.3.1 Popis důležitých částí programu

```
uint8_t distance[] = { 0x55 };
uint8_t buffer[] = { 0, 0 };
HAL_UART_Transmit(&huart5, distance, 1, HAL_MAX_DELAY);
HAL_UART_Receive(&huart5, buffer, 2, 300);
```

Po inicializaci UARTu pro komunikaci s ultrazvukovým senzorem US-100 (nastavení přenosové rychlosti 9600 baudů) je komunikace prováděna pomocí HAL knihovny příkazy HAL\_UART\_Transmit a HAL\_UART\_Receive. Prvním parametrem funkcí je výběr UARTu, druhým je ukazatel na data, která se mají odeslat, nebo kam se mají přichodzí data uložit. Třetí parametr určuje velikost dat a poslední čas timeoutu.

```
HAL_TIM_PWM_Start(&htim14, TIM_CHANNEL_1); //M1
```

Pro použití PWM na daném kanále timeru je nejprve potřeba PWM spustit příkazem HAL\_TIM\_PWM\_Start s parametry vybírajícími timer a kanál.

```
__HAL_TIM_SET_COMPARE(&htim14, TIM_CHANNEL_1, pulse); //M1
```

Pro nastavení střídání slouží příkaz `__HAL_TIM_SET_COMPARE` s parametry vybírajícími timer a kanál. Poslední parametr slouží k nastavení samotné střídání PWM (nastavení otáček motoru). Rozsah střídání si uživatel definuje při nastavení daného timeru v prostředí CubeMX.

```
//M1_forwards
HAL_GPIO_WritePin(M1_ENABLE_GPIO_Port, M1_ENABLE_Pin, SET); //Enable=H
HAL_GPIO_WritePin(M1_INPUT1_GPIO_Port, M1_INPUT1_Pin, RESET); //C=L
HAL_GPIO_WritePin(M1_INPUT2_GPIO_Port, M1_INPUT2_Pin, SET); //D=H
```

Pro ovládání můstku není zapotřebí vždy používat PWM. Lze používat i logické hodnoty, kdy nastavením ENABLE na 1 volíme střídání 100 %, tedy maximální výkon. Použitím příkazu pro zápis na GPIO pin `HAL_GPIO_WritePin` s parametry daného portu, pinu a logické hodnoty, kterou chceme zapsat, můžeme motor také ovládat.

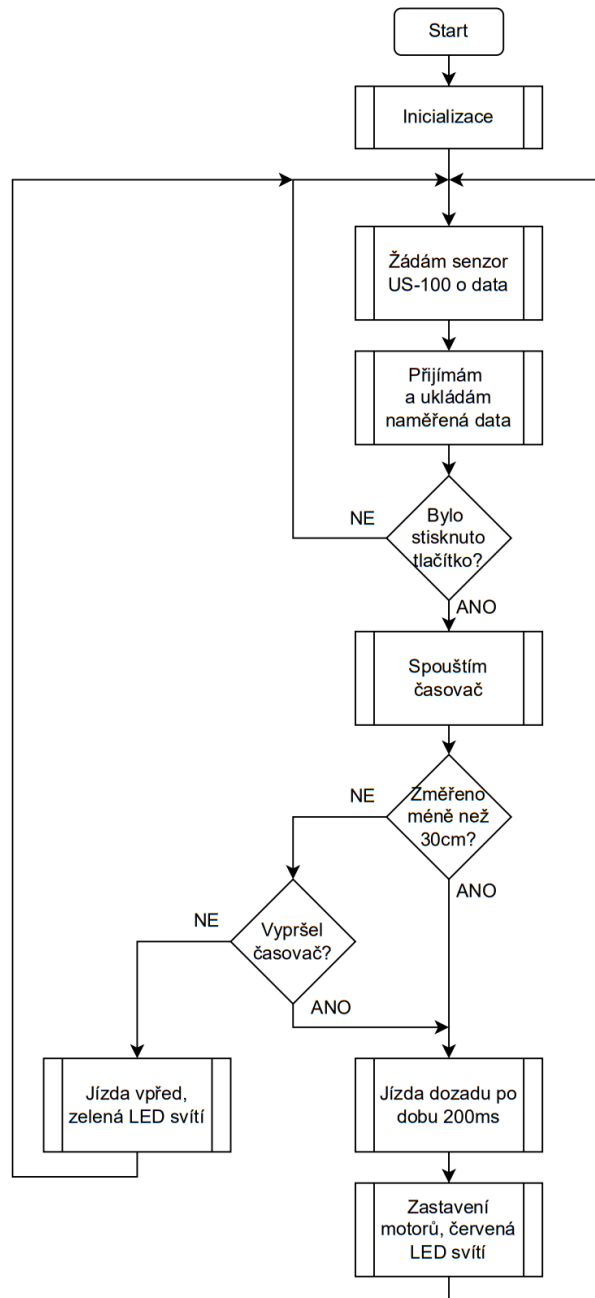
```
HAL_GPIO_WritePin(M1_ENABLE_GPIO_Port, M1_ENABLE_Pin, RESET); //Enable=L
```

Nastavením ENABLE na nízkou logickou úroveň přestane můstek dodávat motoru napětí (odpovídá PWM střídání 0 %). Motory se s určitou setrvačností přestanou točit. U reálného demonstrátoru je dojezd po vypnutí motorů (z maximálního výkonu) řádově desítky centimetrů v závislosti na povrchu.

```
//if btn pressed
if (HAL_GPIO_ReadPin(BTN1_GPIO_Port, BTN1_Pin) == 0)
    btn = 1;
```

Ke čtení stavu tlačítka slouží obdobný příkaz jako k zápisu na GPIO pin, a to čtení z GPIO pinu `HAL_GPIO_ReadPin` s parametry portu a pinu, ze kterého chceme číst.

### 5.3.2 Program pro zastavení před překážkou



Obr. 5-6: Vývojový diagram programu pro zastavení před překážkou

Po startu programu se provede inicializace (nastavení pinů, proměnných atd.). Nucleo poté pošle po UARTu příkaz ultrazvukovému senzoru reprezentující žádost o naměřená data. Senzor pošle data a Nucleo je přijme a uloží. Následně se kontroluje stav tlačítka. Pokud bylo tlačítko stisknuto, spustí se časovač a zjišťuje se, zda je naměřená vzdálenost menší než 30 cm a pokud není, dojde ke kontrole vypršení časovače a demonstrátor jede vpřed. Pokud je vzdálenost menší nebo došlo k vypršení časovače, rozjede se dozadu po dobu 200 ms a následně vypne motory a čeká na další stisk tlačítka.



## 6. ZÁVĚR

Výsledkem této práce je 3D tištěný zmenšený model automobilu (demonstrátor) s implementovanými aktivními bezpečnostními prvky, které zabraňují nárazu demonstrátoru do překážek při autonomním pohybu.

V této práci byla provedena rešerše stávajících bezpečnostních systémů vozidel. Vysvětlen byl rozdíl mezi aktivními a pasivními bezpečnostními systémy a jaké rozdíly přicházejí s bezpečností elektromobilů.

Byly vybrány vhodné senzory pro aktivní bezpečnostní systém demonstrátoru, a to na základě principu měření, vlastností, komunikace a dostupnosti. Těmito senzory jsou dva Time-of-Flight senzory: VL53L0X a VL53L1X; ultrazvukový senzor US-100 a RPLIDAR A1M8.

Navržena a vyrobena byla také mechanika reálného prototypu demonstrátoru, jednotlivé díly byly vytištěny na 3D tiskárně a sešroubovány. Byly vybrány vhodné materiály pro tisk dílů. Pro pevnou konstrukci byl vybrán materiál PETG a pro pneumatiky a odpružení materiál TPE 88. Během výroby došlo k mnoha úpravám na základě poznatků zjištěných z předchozích verzí. Jednotlivé iterace 3D tištěných dílů jsou v této práci popsány. Návrh mechaniky byl přizpůsoben plánovanému způsobu výroby. Zavedená opatření při návrhu jsou zde popsána a kompenzují některé limitace 3D tisku.

Pro řízení elektroniky demonstrátoru byla vybrána vývojová deska Nucleo. Deska má dostatek periférií, výkonu a byla k dispozici skladem. Pro tuto vývojovou desku byl navržen rozšiřující shield, který se na desku nasazuje. Byly vybrány součástky pro DPS shieldu a vytvořena byla také DPS pro akumulátory. Práce dále popisuje parametry a důvody výběru daných součástí společně s funkcí jednotlivých bloků zapojení.

Naprogramován byl bezpečnostní algoritmus, který vyhodnocuje vzdálenost před demonstrátorem. Je-li naměřená vzdálenost menší než 30 cm, demonstrátor se rozjede dozadu po dobu 200 ms a poté vypne motory. Dojezdová vzdálenost po vyhodnocení překážky v blízkosti se díky jízdě dozadu oproti pouhému vypnutí motorů zkrátí z desítek na jednotky centimetrů.

DPS shieldu je připravena pro připojení komunikačního modulu pro případné ovládání. Práce obsahuje výčet výhod a nevýhod jednotlivých druhů ovládání. I bez realizace dálkového ovládání však demonstrátor plní svou funkci.

Dalším pokračováním ve vývoji demonstrátoru by mohlo být přidání dalších senzorů vzdálenosti popsaných v této práci, realizace dálkového ovládání a úprava konstrukce pro výkonnější motory. Pro tyto rozšíření je elektronika demonstrátoru připravena.

# Literatura

- [1] *STMicroelectronics VL53L0X Datasheet: World's smallest Time-of-Flight ranging and gesture detection sensor* [online]. In: . 2018, s. 40 [cit. 2020-11-22]. Dostupné z: <https://www.pololu.com/file/0J1187/vl53l0x.pdf>
- [2] *STMicroelectronics: Proximity Sensors* [online]. [cit. 2020-11-22]. Dostupné z: <https://www.st.com/en/imaging-and-photonics-solutions/proximity-sensors.html>
- [3] Time of flight. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-11-22]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Time\\_of\\_flight](https://en.wikipedia.org/wiki/Time_of_flight)
- [4] *Pololu VL53L0X: Time-of-Flight Distance Sensor Carrier with Voltage Regulator* [online]. [cit. 2020-11-23]. Dostupné z: <https://www.pololu.com/product/2490>
- [5] *STMicroelectronics UM2039 User Manual: World smallest Time-of-Flight ranging and gesture detection sensor Application Programming Interface* [online]. In: . 2016, s. 26 [cit. 2020-11-29]. Dostupné z: [https://www.st.com/resource/en/user\\_manual/dm00279088-world-smallest-timeofflight-ranging-and-gesture-detection-sensor-application-programming-interface-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/user_manual/dm00279088-world-smallest-timeofflight-ranging-and-gesture-detection-sensor-application-programming-interface-stmicroelectronics.pdf)
- [6] *Automobilová elektronika 1: Asistenční a informační systémy*. Brno: Prof. Ing. František Vlk, DrSc., 2006. ISBN 80-239-6462-3.
- [7] *STMicroelectronics VL53L1X Datasheet: A new generation, long distance ranging Time-of-Flight sensor based on ST's FlightSense™ technology* [online]. In: . 2018, s. 35 [cit. 2020-12-05]. Dostupné z: <https://www.pololu.com/file/0J1506/vl53l1x.pdf>
- [8] *Pololu VL53L1X: Time-of-Flight Distance Sensor Carrier with Voltage Regulator* [online]. [cit. 2020-12-05]. Dostupné z: <https://www.pololu.com/product/3415>
- [9] *STMicroelectronics UM2356 User manual: VL53L1X API user manual* [online]. In: . 2018, s. 28 [cit. 2020-12-05]. Dostupné z: [https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/user\\_manual/group0](https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/user_manual/group0)

[/98/0d/38/38/5d/84/49/1f/DM00474730/files/DM00474730.pdf/jcr:content/translations/en.DM00474730.pdf](https://www.okystar.com/product-item/ultrasonic-sensor-distance-measuring-sensor-oky3262/#tab-id-1)

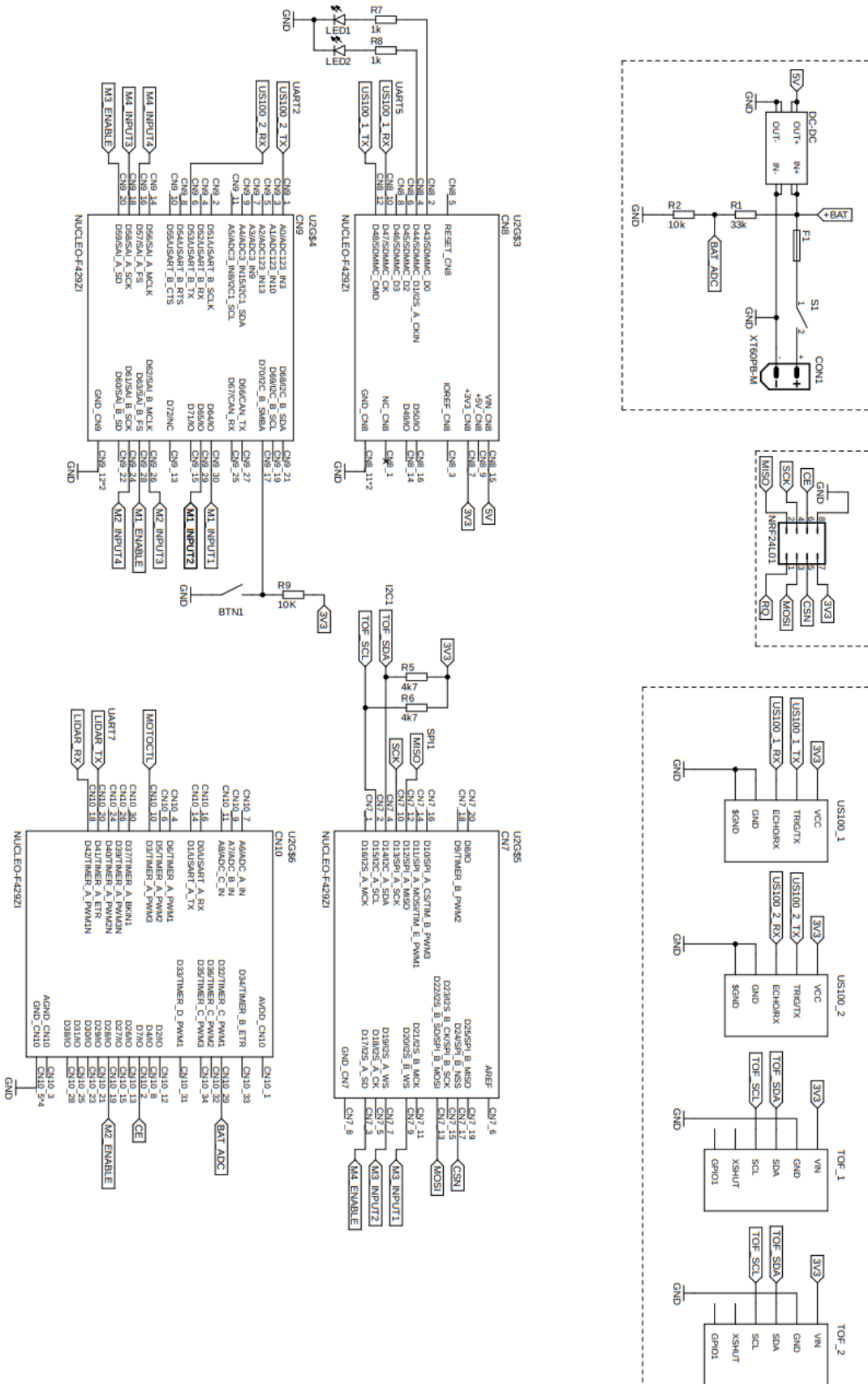
- [10] *OKY3262: US-100 Ultrasonic Sensor Distance Measuring Sensor* [online]. In: . [cit. 2020-12-06]. Dostupné z: <https://www.okystar.com/product-item/ultrasonic-sensor-distance-measuring-sensor-oky3262/#tab-id-1>
- [11] *Adafruit: US-100 Ultrasonic Distance Sensor - 3V or 5V Logic* [online]. In: . [cit. 2020-12-06]. Dostupné z: [https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Adafruit%20PDFs/4019\\_Web.pdf](https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Adafruit%20PDFs/4019_Web.pdf)
- [12] *YourDuino: US-100 Ultrasonic Ranging Module / dual interface pulse/ UART mode* [online]. [cit. 2020-12-06]. Dostupné z: [http://www.yourduino.com/sunshop/index.php?l=product\\_detail&p=121](http://www.yourduino.com/sunshop/index.php?l=product_detail&p=121)
- [13] *E-Gizmo Mechatronix Central: Ultrasonic Sonar Module* [online]. In: . 2011, s. 4 [cit. 2020-12-06]. Dostupné z: <https://mirrobo.ru/micro/wp-content/uploads/2017/01/ultrasonic-sonar-module-1r0.pdf>
- [14] WILLIAMS AND WANG LLC. *US-100 Ultrasonic Distance Sensor Module*. <https://www.bananarobotics.com/shop/> [online]. [cit. 2020-12-06]. Dostupné z: <https://www.bananarobotics.com/shop/US-100-Ultrasonic-Distance-Sensor-Module>
- [15] *Slamtec RPLIDAR A1: Low Cost 360 Degree Laser Range Scanner Introduction and Datasheet* [online]. In: . 2020 [cit. 2020-12-06]. Dostupné z: [http://bucket.download.slamtec.com/7fe7e3656e811ab1a645753af40809f05fa7ddcd/LD108\\_SLAMTEC\\_rplidar\\_datasheet\\_A1M8\\_v2.4\\_en.pdf](http://bucket.download.slamtec.com/7fe7e3656e811ab1a645753af40809f05fa7ddcd/LD108_SLAMTEC_rplidar_datasheet_A1M8_v2.4_en.pdf)
- [16] *Slamtec RPLIDAR A1: Low Cost 360 Degree Laser Range Scanner Development Kit User Manual* [online]. In: . s. 15 [cit. 2020-12-06]. Dostupné z: [http://bucket.download.slamtec.com/e680b4e2d99c4349c019553820904f28c7e6ec32/LM108\\_SLAMTEC\\_rplidarkit\\_usermaunal\\_A1M8\\_v1.0\\_en.pdf](http://bucket.download.slamtec.com/e680b4e2d99c4349c019553820904f28c7e6ec32/LM108_SLAMTEC_rplidarkit_usermaunal_A1M8_v1.0_en.pdf)
- [17] ČESKÝ STATISTICKÝ ÚŘAD. *Nehody v dopravě - časové řady* [online]. 01.12.2020 [cit. 2020-12-09]. Dostupné z: [https://www.czso.cz/csu/czso/nehody\\_v\\_doprave\\_casove\\_rady](https://www.czso.cz/csu/czso/nehody_v_doprave_casove_rady)

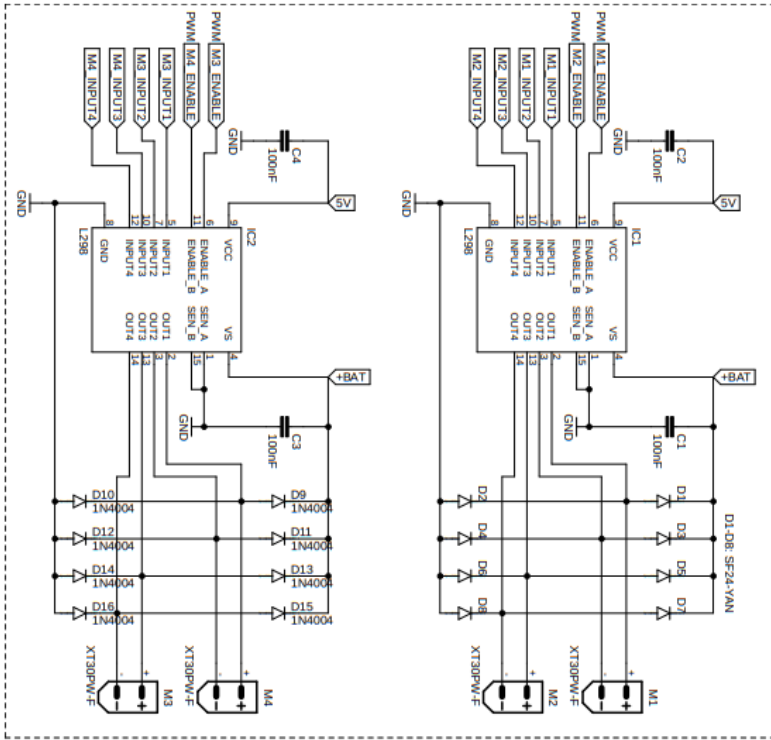
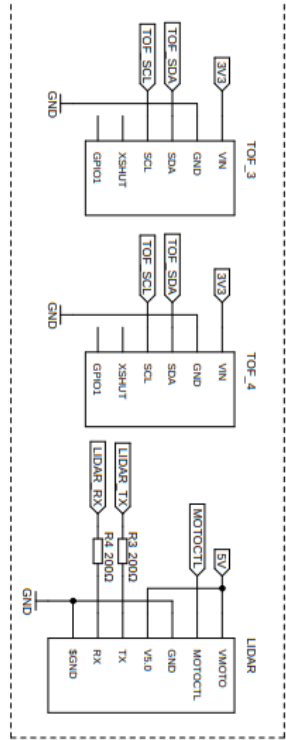
- [18] ROADSAFETYFACTS. *ACTIVE SAFETY SYSTEMS: WHAT ARE THEY AND HOW DO THEY WORK?* [online]. [cit. 2020-12-09]. Dostupné z: <https://roadsafetyfacts.eu/active-safety-systems-what-are-they-and-how-do-they-work/>
- [19] ROADSAFETYFACTS. *PASSIVE SAFETY SYSTEMS: WHAT ARE THEY AND HOW DO THEY WORK?* [online]. [cit. 2020-12-09]. Dostupné z: <https://roadsafetyfacts.eu/passive-safety-systems-what-are-they-and-how-do-they-work/>
- [20] ELEKTRICKEVOZY. *Rozhovor: Jak (ne)bezpečné jsou požáry elektroaut podle hasičů?* [online]. 8. 12. 2019 [cit. 2020-12-10]. Dostupné z: <https://elektrickevozy.cz/clanky/rozhovor-jak-nebezpecne-jsou-pozary-elektroaut-podle-hasicu>
- [21] EURO NCAP. *BEST IN CLASS CARS OF 2019* [online]. [cit. 2020-12-10]. Dostupné z: <https://www.euroncap.com/en/ratings-rewards/best-in-class-cars/2019/>
- [22] TESLA. *Model 3 Pokyny pro nouzové situace* [online]. In: . s. 3 [cit. 2020-12-10]. Dostupné z: [https://www.tesla.com/sites/default/files/downloads/Model\\_3\\_Emergency\\_Response\\_Sheet\\_cs\\_cz.pdf](https://www.tesla.com/sites/default/files/downloads/Model_3_Emergency_Response_Sheet_cs_cz.pdf)
- [23] PRUSA RESEARCH A.S. *Prusament PETG Jet Black 1kg: About PETG* [online]. [cit. 2022-01-29]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/cs/produkt/prusament-petg-jet-black-1kg/#about-petg>
- [24] FILAMENT PM. *TPE 88 RubberJet Flex* [online]. [cit. 2022-02-18]. Dostupné z: <https://www.filament-pm.cz/tpe-88-rubberjet-flex-cerna-1-75-mm-0-5-kg/p97>
- [25] STMICROELECTRONICS. *STM32F427xx STM32F429xx* [online]. 2018 [cit. 2022-05-30]. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f429zi.pdf>
- [26] ARM LIMITED. *NUCLEO-F429ZI* [online]. [cit. 2022-05-30]. Dostupné z: <https://os.mbed.com/platforms/ST-Nucleo-F429ZI/>

## Seznam příloh

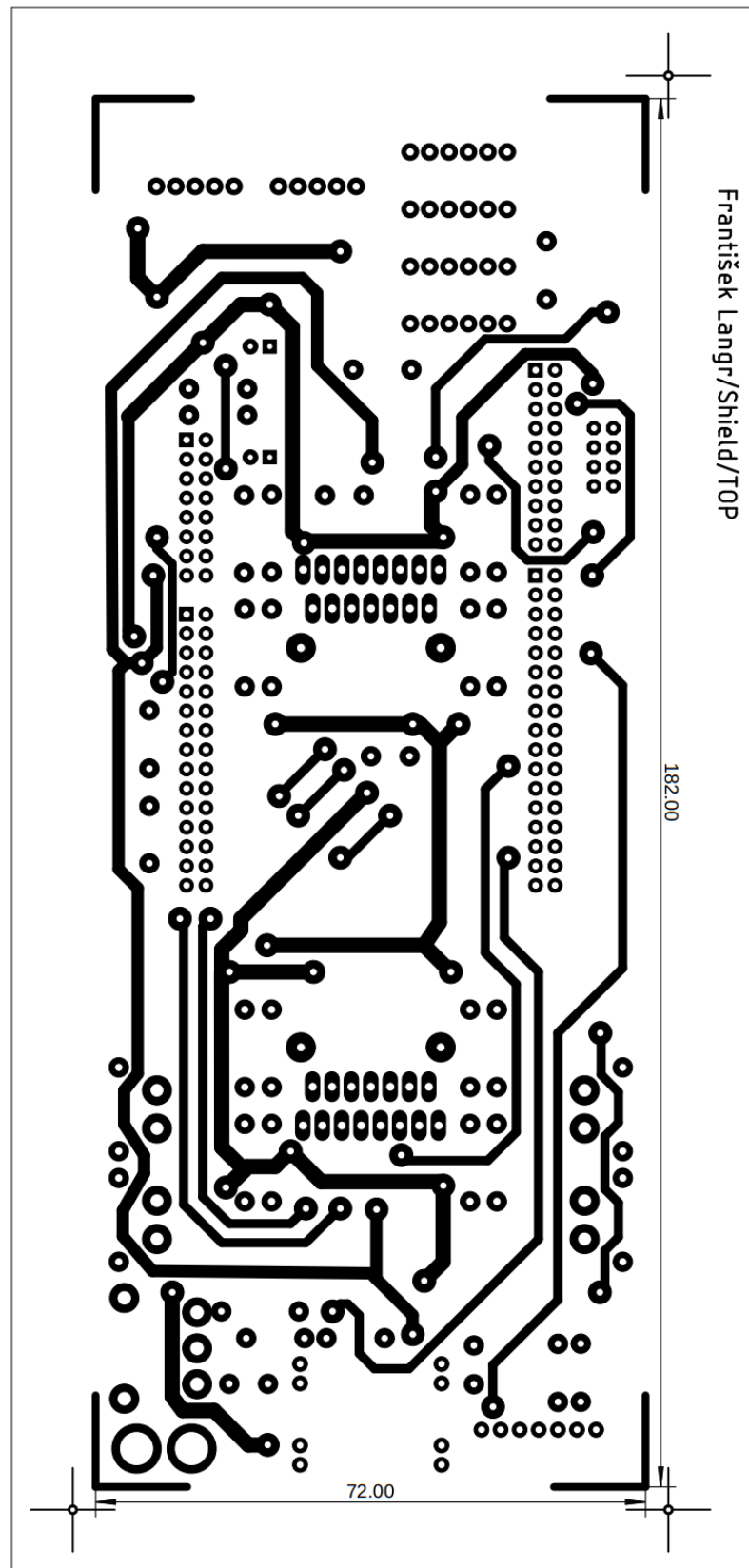
Příloha 1 - Schéma zapojení DPS shieldu .....	54
Příloha 2 - DPS shieldu strana TOP.....	56
Příloha 3 - DPS shieldu strana BOTTOM .....	57
Příloha 4 - Osazovací plán pro DPS shieldu.....	58
Příloha 5 - DPS pro akumulátory strana BOTTOM .....	59

# Příloha 1 - Schéma zapojení DPS shieldu



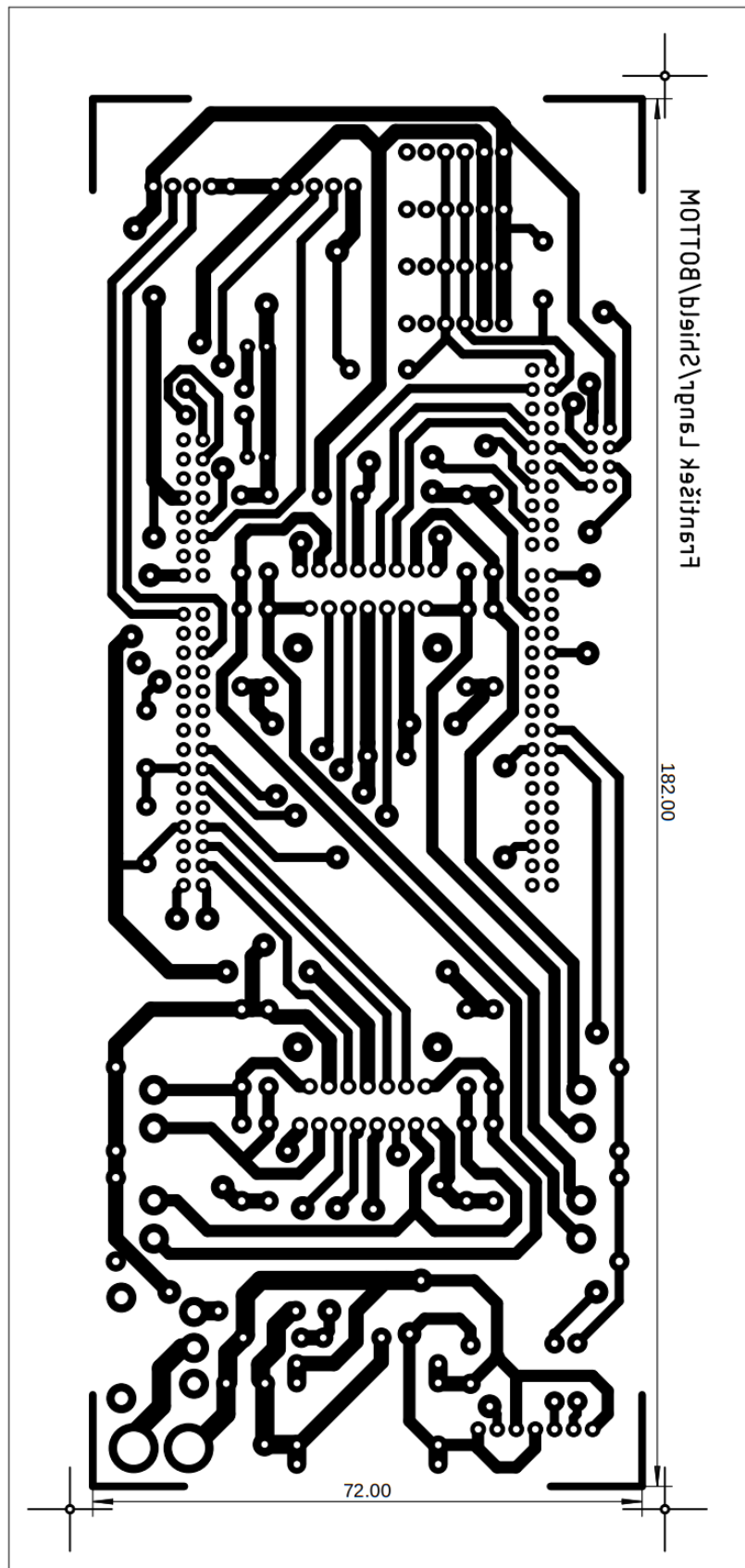


## Příloha 2 - DPS shieldu strana TOP

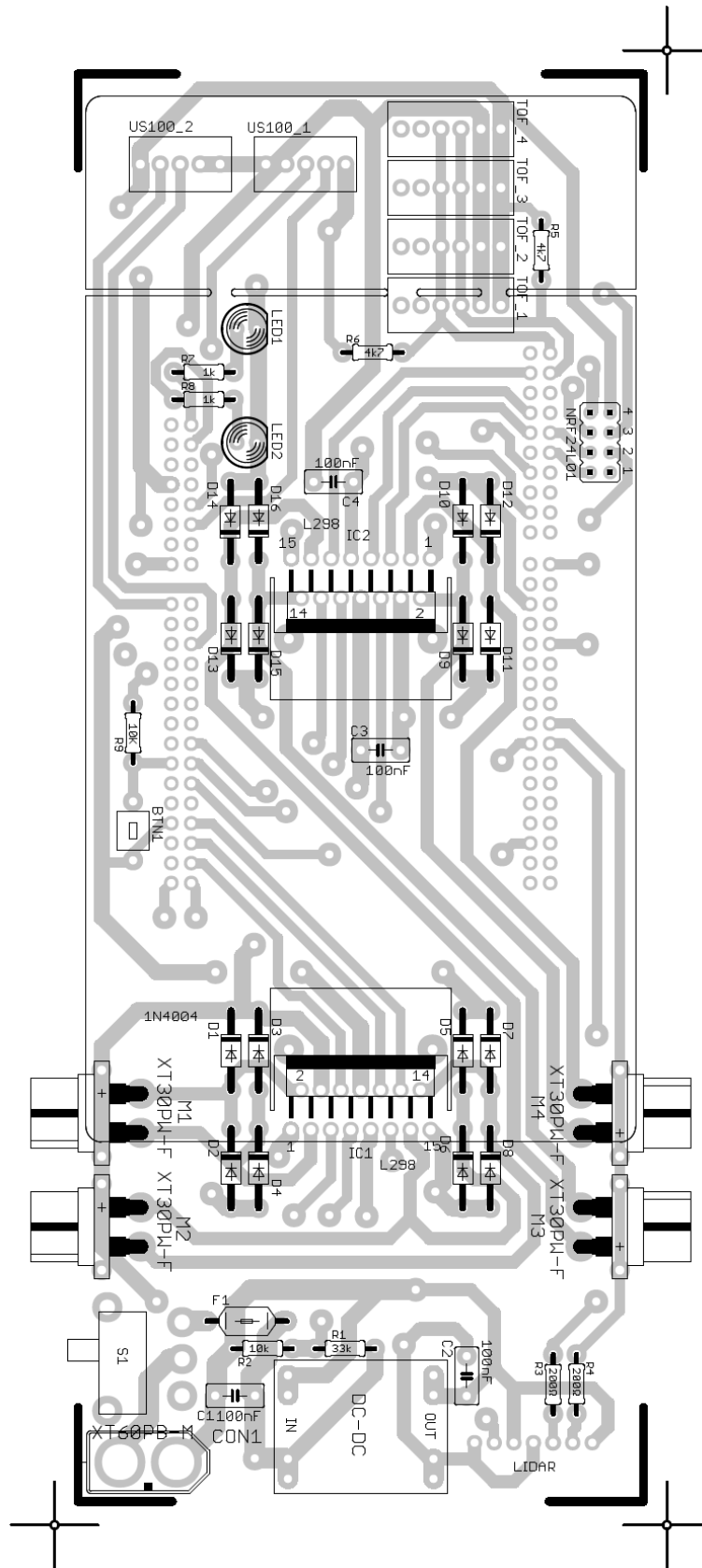




### Příloha 3 - DPS shieldu strana BOTTOM



# Příloha 4 - Osazovací plán pro DPS shieldu



# Příloha 5 - DPS pro akumulátory strana BOTTOM

