



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

ÚSTAV INTELIGENTNÍCH SYSTÉMŮ

DEPARTMENT OF INTELLIGENT SYSTEMS

**BEZDRÁTOVÁ ROTAČNÍ HLAVA PRO SNÍMÁNÍ
VNITŘNÍCH POVRCHŮ**

WIRELESS ROTARY HEAD FOR SCANNING INTERNAL SURFACES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. ROSTISLAV HORÁK

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PETR MALANÍK

BRNO 2024

Zadání diplomové práce



157094

Ústav: Ústav inteligentních systémů (UITS)
Student: **Horák Rostislav, Bc.**
Program: Informační technologie a umělá inteligence
Specializace: Vestavěné systémy
Název: **Bezdrátová rotační hlava pro snímání vnitřních povrchů**
Kategorie: Vestavěné systémy
Akademický rok: 2023/24

Zadání:

1. Seznamte se zařízením pro snímání povrchu hlavně.
2. Nastudujte možnosti bezdrátového napájení a komunikace v průmyslovém prostředí. Dále se zaměřte na ovládání krokových motorů a senzorů pro měření vzdálenosti.
3. Navrhněte zařízení, které umožňuje kontinuálně rotovat hlavou osazenou senzory uvnitř objektu a posílá data ze senzorů a z kamery do stacionární části zařízení, kde bude probíhat jejich zpracování.
4. Navržené zařízení realizujte a připravte demonstrační aplikaci, která umožní řídit rotační hlavu a zároveň zobrazovat získaná data.
5. Nasnímejte několik povrchů pomocí tohoto zařízení a zhodnoťte získaná data. Zaměřte se hlavně na kvalitou získaných snímků a pokrytí povrchu hloubkovými daty. Pozornost také věnujte optimální rychlosti snímání vzhledem k nastavení kamery a kvalitě získaných dat.

Literatura:

- SCARPINO, Matthew, 2015. *Motors for makers: A guide to steppers, servos, and other electrical machines*. B.m.: Que Corporation. ISBN 9780134032832.
- ZURAWSKI, Richard, ed., 2009. *Embedded systems handbook, second edition: Networked embedded systems*. Boca Raton, FL: CRC Press. ISBN 9781439807613.

Při obhajobě semestrální části projektu je požadováno:
Splnění bodů 1 a 2, rozpracování bodu 3.

Podrobné závazné pokyny pro vypracování práce viz <https://www.fit.vut.cz/study/theses/>

Vedoucí práce: **Malaník Petr, Ing.**
Vedoucí ústavu: Hanáček Petr, doc. Dr. Ing.
Datum zadání: 1.11.2023
Termín pro odevzdání: 17.5.2024
Datum schválení: 6.11.2023

Abstrakt

Cílem této práce je vytvoření bezdrátové rotační hlavy pro snímání vnitřních povrchů. To zahrnuje návrh a vytvoření zařízení se statickou a rotační částí, které komunikují bezdrátově a rotační hlava je zároveň bezdrátově napájena. Tím umožní kontinuální rotaci a snímání. Další částí je sběr dat ze senzorů a komunikace mezi jednotlivými částmi zařízení a s okolním světem. Zaměřuje se zejména bezdrátovou komunikaci pomocí infračerveného světla, bezdrátové napájení a řízení krokového motoru. Práce popisuje použité technologie a principy na kterých je zařízení založeno, návrh a implementaci hardwaru a softwaru, představení dosažených výsledků.

Abstract

The purpose of this project is to create wireless rotary head for scanning internal surfaces. Which includes design and implementation of device with static and rotary parts. The two parts communicate wirelessly and the rotary part is also wirelessly charged. That enables continuous rotation and measurment. Another part of project is data collection from sensors and communication between parts of the device and also with external world. Focus is given to wireless communication using IR light, wireless power transfer and control of stepper motor. Project describes technologies and principles on which it is based, design and implementation of hardware and software, presentation of achieved results.

Klíčová slova

Vestavěný systém, IR bezdrátová komunikace, krokový motor, bezdrátové napájení, mikrokontrolér, skenování povrchů, laserové měření vzdálenosti.

Keywords

Embedded system, IR wireless communication, stepper motor, wireless charging, microcontroller, surface scanning, laser distance measurment.

Citace

HORÁK, Rostislav. *Bezdrátová rotační hlava pro snímání vnitřních povrchů*. Brno, 2024. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Ing. Petr Malaník

Bezdrátová rotační hlava pro snímání vnitřních povrchů

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením pana inženýra Petra Malaníka. Uvedl jsem všechny literární prameny, publikace a další zdroje, ze kterých jsem čerpal.

.....
Rostislav Horák
17. května 2024

Poděkování

Děkuji vedoucímu, panu inženýru Petru Malaníkovi za vedení, trpělivost a všechny rady které mi dal.

Obsah

1	Úvod	2
2	Teoretický přehled	3
2.1	Bezdrátové napájení	3
2.2	Bezdrátová komunikace	11
2.2.1	Optická bezdrátová komunikace	11
2.3	Optické senzory	13
2.3.1	Měření vzdálenosti pomocí laseru	14
2.4	Elektromotory	18
2.4.1	Struktura elektromotoru	18
2.4.2	Přehled elektromotorů	20
2.4.3	Vlastnosti elektromotorů	20
2.4.4	Stejnsměrné (DC) motory	25
2.4.5	Krokové motory	35
3	Navrhnuté řešení	47
3.1	Rotace bezdrátové snímací hlavy	51
3.2	Bezdrátová komunikace	54
3.3	Bezdrátové napájení	55
3.4	Návrh desek plošných spojů	56
3.4.1	Statická deska plošných spojů	56
3.4.2	Rotační deska plošných spojů	60
3.4.3	Deska napájení cívky	65
3.5	Návrh mechanického 3D modelu	66
4	Implementace	68
4.1	Zapojení systému	68
4.2	RaspberryPi	69
4.3	Statická část	71
4.4	Rotační část	72
4.5	Demonstrační aplikace	73
5	Testování a zhodnocení výsledků	75
6	Závěr	80
	Literatura	81

Kapitola 1

Úvod

Cílem práce je vytvoření zařízení umožňující kontinuální měření povrchu dutiny (zejména cíleno na vnitřní povrch hlavně). Zařízení se skládá ze dvou částí, části stacionární a části rotační. Předchozí zařízení používalo kabelové propojení těchto částí, tudíž by nemohlo rotovat kontinuálně a jednou za čas by muselo rotovat zpět do výchozí polohy, aby nedošlo k poškození kabelů. Cílem je řešit tento nedostatek bezdrátovým propojením stacionární a rotační části. Jedná se o bezdrátové napájení a komunikaci.

Stacionární část obsahuje výstupní rozhraní jako Ethernet RaspberryPi, stacionární desku plošných spojů s mikrokontrolérem STM32. Mikrokontrolér řídí rotaci pomocí krokového motoru. Dále řídí komunikaci s rotační deskou a zároveň komunikaci s RaspberryPi, které slouží jako centrální řízení systému. Zařizuje sběr dat ze stacionárních senzorů jako je kamera, následnou agregaci a zpracování dat ze senzorů.

Rotační část se skládá z rotační desky plošných spojů, obsahující mikrokontrolér STM32, který sbírá data ze senzorů a posílá je stacionární části. Rotační deska obsahuje i akcelerátor a gyroskop (IMU), které slouží ke zjištění úhlu natočení rotační desky. K rotační desce jsou připojeny laserové měřiče vzdálenosti, které měří povrch s rozlišením v mikrometrech a laserový měřák vzdálenosti zanoření v dutině s rozlišením v milimetrech. Rotační část obsahuje i zrcátko pro snímání povrchu kamerou a osvětlení povrchu pomocí LED pásků.

Bezdrátová komunikace mezi částmi je řešena pomocí infračervených LED a infračervených fotodiod. Bezdrátové napájení je řešeno indukci pomocí cívek.

Následující kapitola 2 se zabývá shrnutím teorie a technologií, na kterých se projekt zakládá. Obsahuje popis bezdrátového napájení, bezdrátové komunikace, optického měření vzdálenosti, elektromotorů a jejich řízení. Následuje kapitola 3 o návrhu řešení, ve které je představen návrh řešení, jak celku, tak návrh hlavních subsystémů jako je rotace bezdrátové hlavy pomocí krokového motoru, bezdrátová komunikace pomocí infračerveného světla, bezdrátový přenos energie, návrh desek plošných spojů pro statickou a rotační část a návrh mechanických částí zařízení. Další kapitola 4 o implementaci popisuje programování jednotlivých částí a popisuje vytvoření demonstrační aplikace. Předposlední kapitola 5 představuje testování zařízení a zhodnocení výsledků snímání povrchu. Nakonec je kapitola závěr 6 shrnující dosažené výsledky a popisuje možné vylepšení do budoucna.

Kapitola 2

Teoretický přehled

Kapitola představí možné řešení bezdrátového napájení a komunikace použité pro spojení statické a rotační části zařízení. Dále představí měřicí senzory optické a laserové měřáky vzdálenosti, používané pro skenování povrchu. Představí elektromotory, zejména zaměřené na krokové motory a jejich řízení.

2.1 Bezdrátové napájení

Bezdrátový přenos energie je technologie, která umožňuje zdroji energie vysílat elektromagnetickou energii k elektrickému spotřebiči přes vzduchovou mezeru, bez použití propojovacích kabelů [18]. Tato technologie je použita v širokém rozsahu aplikací, od nízko výkonových, jako jsou elektrické zubní kartáčky, po vysoko výkonové, jako jsou elektrická auta. V dnešní době se vývoj technologie bezdrátového napájení rychle rozvíjí. Hlavně kvůli mobilním telefonům a chytrým přenosovým zařízením.

Oproti tradičnímu drátovému nabíjení přináší následující výhody [18]:

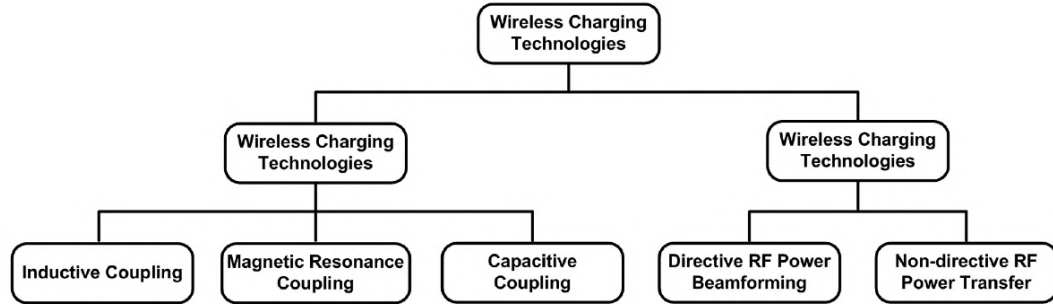
- Zlepší uživatelskou přívětivost, není potřeba připojovat žádný kabel. Různé značky a modely zařízení mohou používat jednu nabíječku.
- Umožňuje design a výrobu menších zařízení, není potřeba baterie.
- Poskytuje lepší odolnost produktu (vodotěsnost, prachotěsnost) bezkontaktních zařízení.
- Zvyšuje flexibilitu, hlavně pro zařízení, u kterých je výměna baterie nebo připojení kabelu problémové, drahé nebo nemožné (implantované senzory v lidském těle).
- Bezdrátové napájení může přesně poskytovat energii požadovanou nabíjeným zařízením, tím zvyšuje flexibilitu a energetickou efektivitu.

Nicméně je použití bezdrátového napájení oproti drátovému dražší, kvůli použití komplexnějších a větších komponent. Navíc produkují více tepla, tím zvyšují cenu nebo změnu výrobních materiálů.

Vývoj bezdrátového napájení směřuje dvěma hlavními směry [18]. Jedním je radiační (vyzařovací) bezdrátové napájení (založené na RF - rádiových frekvencích). Druhým směrem je neradiační bezdrátové napájení (založené na vazbách). Radiační bezdrátové napájení používá elektromagnetické vlny, typicky RF vlny nebo mikrovlny, jako médium přenosu

energie ve formě záření (radiace). Energie je přenesena pomocí elektrického pole elektromagnetických vln. Kvůli bezpečnostním rizikům radiální bezdrátové napájení funguje v nízké energetické oblasti. Pro příklad, všesměrové RF záření je vhodné pouze pro senzorické uzly se spotřebou do 10mW.

Alternativně, neradiační bezdrátové napájení je založeno na vazbách magnetických polí mezi dvěma cívkami, ve vzdálenosti schopné přenosu energie. Protože magnetické pole elektromagnetické vlny slábne mnohem rychleji než elektrické pole, vzdálenost přenosu energie je velmi limitována [18]. Kvůli bezpečné implementaci neradiačního bezdrátového napájení je široce používán v běžných spotřebičích.



Obrázek 2.1: Klasifikace technologií bezdrátového napájení, převzato z [18].

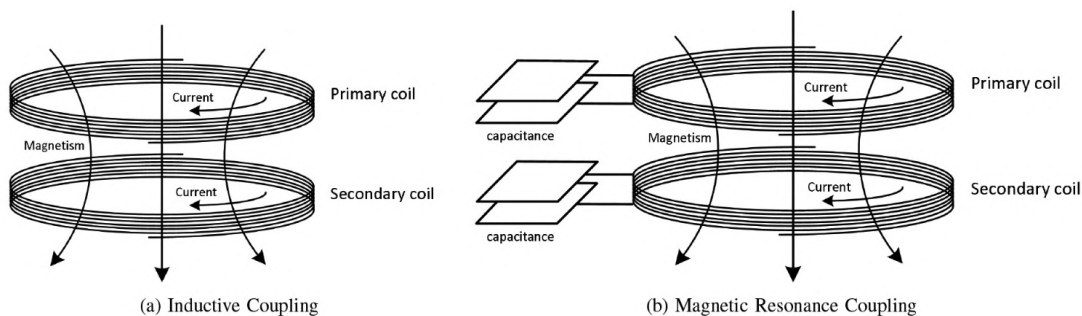
Jak je ukázáno na obrázku 2.1, technologie bezdrátového napájení lze rozdělit na neradiační založené na vazbách (non-radiative coupling-based) a radiální založené na RF (radiative RF-based). První se skládá ze tří technik: indukční vazba, vazba magnetickou rezonancí, kapacitní vazba. Druhá se dá dále rozdělit na směrové vytváření RF paprsku a nesměrovaný RF přenos energie.

Kapacitní vazba je závislá na obsahu dostupné plochy zařízení. Nicméně pro typickou velikost přenosných elektrických zařízení je obtížné vytvořit přenos s dostatečnou energetickou hustotou, což představuje obtížnou limitaci designu [18]. Směrované tvoření RF paprsku je limitováno tím, že potřebuje znát přesnou polohu přijímacího zařízení. Kvůli těmto limitacím se příliš nepoužívají, častěji se používají zbylé tři techniky bezdrátového napájení, a to pomocí magnetické indukční vazby, magnetické rezonanční vazby a nesměrované RF záření.

Magnetická indukční a magnetická rezonanční vazba pracují na blízkých polích, kde generovaná elektromagnetická pole dominuje oblast okolo vysílače [18]. Energie blízkého pole se kubicky tlumí s napájecí vzdáleností. Alternativně mikrovlnné záření pracuje na vzdálených polích, na delší vzdálenosti. Energie vzdálených polí se tlumí se čtvercem napájecí vzdálenosti. Navíc, u vzdálených polí, absorpce záření neovlivňuje vysílač. Naopak, u techniky blízkých polí, absorpce záření ovlivňuje zátěž vysílače. To je kvůli absenci vazby antén vysílače a přijímače u vzdálených polí, kdežto antény vysílače a přijímače jsou svázány pro techniky blízkých polí.

Indukční vazba

Je založena na indukcii magnetického pole, která přenáší energii mezi dvěma cívkami. Obrázek 2.2 nalevo ukazuje referenční model. Indukční přenos energie (IPT - inductive power transfer) nastane, když primární cívka vysílače generuje převážně měnící se magnetické pole



Obrázek 2.2: Modely bezdrátových napájecích systémů, převzato z [18].

přes sekundární cívku přijímače, která je v poli, obecně méně než délku vlny. Magnetická energie blízkého pole pak indukuje napětí a proud přes sekundární cívku přijímače, která je v poli. Tohle napětí pak může být využito k napájení bezdrátového zařízení nebo nabíjení úložného systému.

Operační frekvence indukční vazby je typicky v rozmezí kilo Hertz. Sekundární cívka by měla být laděná na operační frekvenci kvůli zlepšení napájecí efektivity [18]. Faktor kvality cívky je většinou designovaný jako malé číslo (menší než 10). Kvůli chybné kompenzaci cívek s vysokým faktorem kvality je efektivní napájecí vzdálenost do vzdálenosti 20 cm. Indukčně vázaná radiofrekvenční identifikace (RFID) posunuje limity vzdálenosti k desítkám centimetrů za cenu snížené efektivity (1–2 %), s přijímanou energií v oblasti mikro Watt. Navzdory limitované vzdálenosti přenosu, efektivní napájecí energie může být velmi vysoká (úroveň kilowattů pro nabíjení elektrických aut).

Výhody magnetické indukční vazby zahrnuje jednoduchost implementace, pohodlnost operace, vysoká efektivita na krátké vzdálenosti (typicky kratší než průměr cívky) a zajištěná bezpečnost.

Magnetická rezonanční vazba

Je zobrazena na obrázku 2.2 napravo, je založena na vazbě evanescentních vln, které generují a přenášejí elektrickou energii mezi dvěma rezonančními cívkami přes měnící se nebo oscilující magnetická pole. Dvě rezonanční cívky, pracující na stejné rezonanční frekvenci, jsou silně vázané, umožňují vysoce efektivní přenos energie s malým úbytkem do nerezonančních externalit. Pro příklad byl demonstrován prototyp s průměrem sekundární cívky 9,5 mm, který dosahoval 92,6% efektivity přenosu na vzdálenost 0,3 cm [16]. Díky vlastnosti rezonance, magnetická rezonanční vazba má výhodu imunity k okolnímu prostředí a požadavek přímé viditelnosti.

Demonstrace magneticky vázaných rezonátorů ukázaly schopnost přesunu energie, na větší vzdálenosti než indukční vazby s větší efektivitou než RF záření. Dále umožňuje vazbu mezi jedním rezonančním vysílačem a mnoha rezonančními přijímači. Tím umožňuje napájení více zařízení současně.

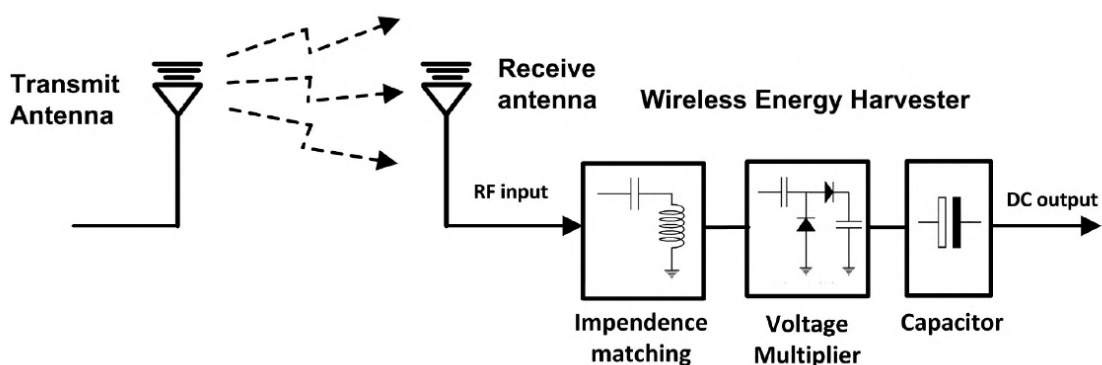
Protože vazba magnetické rezonance typicky pracuje ve frekvenčním rozsahu megahertz, faktor kvality je běžně vysoký. S větší napájecí vzdáleností vysoký faktor kvality pomáhá zmírnit strmý pokles koefektivity, a tím napájecí efektivity. Tudíž je možné rozšířit vzdálenost přenosu energie na rozsah metrů. v roce 2007 výzkumníci z MIT navrhli technologii vysoce efektivního bezdrátového přenosu energie na střední vzdálenosti, nazývaného Witricity, založeného na silné magnetické rezonanční vazbě. Dokázali rozsvítit 60W žárovku

na vzdálenost více než 2 metrů s efektivitou přenosu okolo 40%. Při vzdálenosti 1 metru efektivita vzrostla na 90%. Problém technologie Witricity je velikost, je problém ji zmenšit, kvůli potřebě distribuované kapacity cívky. [18]

RF záření

Používá rozptýlené RF nebo mikrovlny jako médium k přenosu energie záření. RF/mikrovlny se šíří rychlostí světla, normálně v přímé viditelnosti. Typická frekvence RF/mikrovln je od 300 MHz do 300 GHz [18]. Přenos energie může využívat i jiné elektromagnetické vlny jako infračervené a rentgenové. z důvodu bezpečnosti nejsou moc používány.

Přenos energie začíná převodem AC na DC, následované převodem DC na RF pomocí magnetronu na straně vysílače. Po propagaci vzduchem jsou RF/mikrovlny zachyceny rečennou přijímače, která je usměrní zpět na elektřinu, pomocí RF na DC konverze.



Obrázek 2.3: Bezdrátové napájení vzdálených polí, převzato z [18].

Efektivita konverze RF na DC je vysoce závislá na hustotě zachycené energie u přijímačovy antény, přesnost srovnání impedance mezi anténou a násobičem napětí a energetickou efektivitu napěťového násobiče, který převádí přijímané RF signály na DC napětí. Schéma takového systému je na obrázku 2.3.

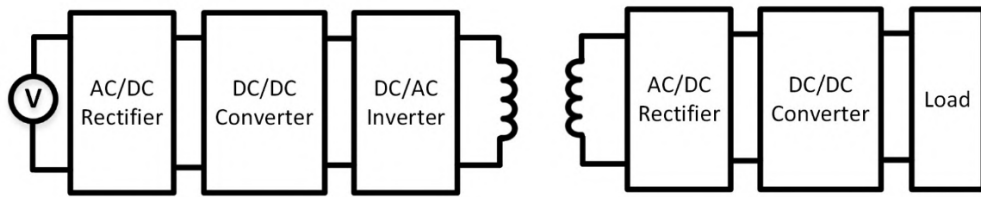
Architektury bezdrátových napájecích systémů

Obrázek 2.4 ukazuje blokový diagram obecného neradiačního bezdrátového napájecího systému. Vysílací strana se skládá z:

- AC/DC usměrňovač, který převádí střídavý proud (AC) na stejnosměrný proud (DC).
- DC/DC převodník, který mění napětí ze vstupní úrovně DC na jinou napěťovou úroveň.
- DC/AC invertor, který mění DC na AC.

Přijímací strana se skládá z:

- AC/DC usměrňovač, který převádí vysokofrekvenční AC na DC.
- DC/DC převodník, upravuje napětí DC na požadovanou úroveň.



Obrázek 2.4: Blokový diagram neradiačního napájecího systému, převzato z [18].

- Elektrický spotřebič, je cílem napájení.

Proces bezdrátového napájení pracuje následovně. Nejdříve zdroj energie aktivuje usměrňovač AC/DC. Protože AC z elektrické sítě celosvětově pracuje na frekvenci 50 Hz nebo 60 Hz, což je moc malá frekvence na přenos energie. Vysílač musí zvýšit frekvenci AC, nejdříve převede AC na DC, pak zvýší napětí DC, následně změní DC na vysokofrekvenční AC. Jak vysokofrekvenční AC prochází vysílací cívku, vytvoří kolem ní magnetické pole, AC je indukován na přijímající cíve oddělené od vysílací cívky vzduchovou mezerou. Přijímač energie následně převede AC na DC a upraví napětí na úroveň vhodnou pro napájený spotřebič.

Indukčně vázané systémy jsou obecně založeny na 4 základních topologiích, a to series-series, series-parallel, parallel-series a parallel-parallel [18]. Tyto topologie se liší způsobem kompenzace kapacity obvodu. Parallel-series a parallel-parallel regulují proud invertoru, který teče do paralelních rezonačních obvodů pomocí přidání dalšího induktoru zapojeného do série, z čeho plyne větší velikost převodníku a větší cena. Navíc tyto dvě topologie mají různé rezonanční kapacity, na základě vazby a faktoru kvality. Proto se více používají topologie series-series a series-parallel.

Naopak, hlavními typy u systémů s vazbou magnetické rezonance jsou sériový vzor obvodu a paralelní vzor obvodu. Sériový by měl být použit u systémů s vysokou pracovní efektivitou a paralelní u systémů s nízkou pracovní efektivitou.

Induktivní vazby používají většinou systém dvou cívek, jak je zobrazeno na obrázku 2.4. Naopak systémy s použitím vazby magnetické rezonance jsou více různorodé. Příkladem je rozšířený systém vazby magnetické rezonance na čtyři cívky se srovnáním impedance, relay resonator system a domino-rezonator system [18].

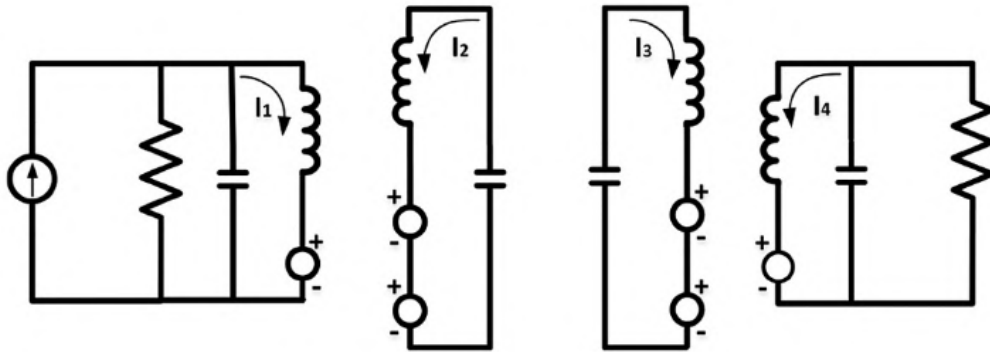
Struktura čtyřcívkového systému obsahuje excitační cívku a vysílací rezonátor na vysílací straně, přijímací rezonátor a cívku zátěže na přijímací straně, jak je zobrazeno na obrázku 2.5. Systém obsahuje další 2 vazby, tím další 2 koeficienty vazby. v porovnání s dvojcívkovým systémem, další 2 koeficienty přidávají volnost rozšíření přenosné vzdálenosti.

Hardwarový design a implementace

Intenzita magnetického pole může být popsána jako funkce vzdálenosti (d) od zdroje následovně:

$$H(d) = \frac{INr^2}{2\sqrt{(r^2 + d^2)^3}} \quad (2.1)$$

Kde I , N a r značí postupně proud, počet otoček cívky a poloměr cívky.



Obrázek 2.5: Architektura čtyřcívkového bezdrátového napájecího systému, převzato z [18].

Podle 2.1 je přímočaré, že zvyšováním otoček a poloměru cívky se může zvýšit intenzita. Nicméně, počet otoček a velikost cívky nejde zvyšovat bez limitu, protože musí být optimalizovaný započítáním přenosové frekvence a odporů. Přijímací cívka by měla být designována s nízkou impedancí k optimálnímu zachycení vyslané energie.

Efektivita přenosu energie neradičního napájecího systému je vysoce závislá na vzájemné indukčnosti mezi cívkami, faktoru kvality Q , faktoru srovnání zátěže [18]. Vzájemná indukčnost páru cívek určuje, jak změna v jedné cívce ovlivní indukovaný proud v cívce druhé. Vzájemná indukčnost je úměrná geometrickému průměru vlastních indukčností přes koeficient vazby. Koeficient vazby znázorňuje těsnost vazby, je určen podle zarovnání a vzdáleností, poměrem průměrů, tvarem cívek.

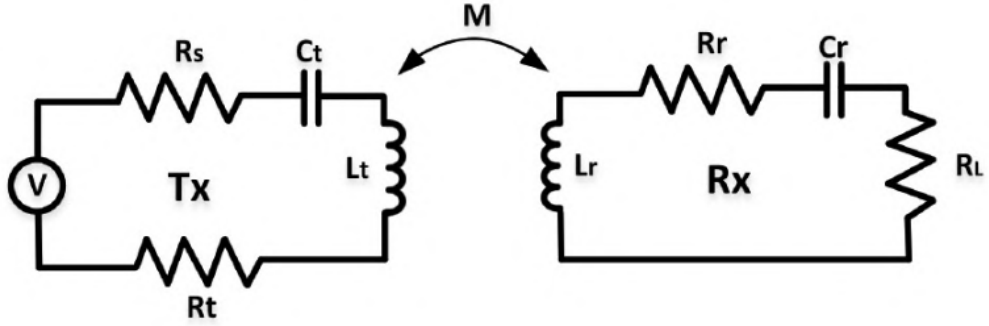
Faktor kvality Q je určen jako poměr uložené energie v rezonátoru a energie poskytnuté generátorem. Výšší Q značí menší míru energetických ztrát systému při přenosu energie. Proto v systémech s vysokým Q oscilace/rezonance klesá pomalu. Faktor kvality je ovlivněn vlastní indukčností, odporem, vlastní frekvencí, které závisí hlavně na výrobním materiálu.

Faktor srovnání zátěže je hlavně závislý na vzdálenosti. Protože rezonanční frekvence páru cívek se mění, se změnou velikosti mezery mezi cívkami [18]. Faktor srovnání zátěže měří, jak těsně jsou srovnány rezonanční frekvence. Pro ladění faktoru srovnání zátěže je navrženo několik způsobů, jako manipulace vazeb, srovnání frekvencí, srovnání impedancí a ladění parametrů rezonátoru. Pro zlepšení přenosu se využívá kompenzačních obvodů [17].

Modely propagace

Tato část se zaměřuje na charakterizaci propagace magnetických vln blízkých polí. Je popsán základní model magnetické indukce v konfiguraci single-input-single-output (SISO). Tento model lze rozšířit na konfigurace multiple-input-single-output (MISO), single-input-multiple-output (SIMO) a multiple-input-multiple-output (MIMO) [18].

SISO je systém magnetické indukce, zobrazen na obrázku 2.6. Nechť r_t a r_r značí poloměr cívek vysílače a přijímače. Vzdálenost cívek je reprezentována d . Nechť ω_0 značí rezonanční úhlovou frekvenci, která váže dvě cívky. Pak, $\omega_0 = 1/\sqrt{L_t C_t} = 1/\sqrt{L_r C_r}$, kde L_t a L_r jsou vlastní indukčnosti cívek. M značí vzájemnou indukčnost, zatímco C_t a C_r značí dva rezonanční kondenzátory. Odporů vysílací a přijímací cívky jsou označeny R_t a R_r . Impedance



Obrázek 2.6: Model SISO, převzato z [18].

zdroje vysílače a spotřebiče přijímače jsou označeny jako R_S a R_L . Podle Kirchoffova zákona napětí, AC zdrojové napětí přes dvě cívky, může být vyjádřeno jako [18, 17]:

$$\begin{aligned} (R_S + R_t + j\omega L_t + \frac{1}{j\omega C_t})I_t + j\omega M I_r &= V_S \\ j\omega M I_t + (R_L + R_r + j\omega L_r + \frac{1}{j\omega C_r})I_r &= 0 \end{aligned} \quad (2.2)$$

Zjednodušením lze vyjádřit energie přenesená na zátěž přijímače jako:

$$P_r = P_t Q_t Q_r \eta_t \eta_r k^2(d) \quad (2.3)$$

Kde P_t je vysílací výkon zdroje vysílače. η_t a η_r značí efektivity vysílače a přijímače, jsou dány jako:

$$\begin{aligned} \eta_t &= \frac{R_S}{R_t + R_S} \\ \eta_r &= \frac{R_L}{R_r + R_L} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Q_t a Q_r jsou faktory kvality vysílací a přijímací cívky, dány jako:

$$\begin{aligned} Q_t &= \frac{\omega L_t}{R_t + R_S} \\ Q_r &= \frac{\omega L_r}{R_r + R_L} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Navíc $k(x)$ značí faktor koeficientu vazby mezi dvěma cívkami. Koeficient vazby je funkcí vzájemné indukčnosti a vlastních indukčností vysílací a přijímací cívky, může být odhadnut následujícím výrazem:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_t L_r}} \quad (2.6)$$

Pokud je znám poloměr cívek a zároveň jejich vzdálenost, koeficient vazby může být vyjádřen jako:

$$k^2(d) = \frac{r_t^3 r_r^3 \pi^2}{(d^2 + r_t^2)^3} \quad (2.7)$$

Dosažením této rovnice, přenesená energie v SISO kanálu může být vyjádřena následovně:

$$P_r = P_t Q_t Q_r \eta_t \eta_r \frac{r_t^3 r_r^3 \pi^2}{(d^2 + r_t^2)^3} \quad (2.8)$$

Existují různé standardy bezdrátového napájení, hlavními jsou Qi a A4WP, které jsou podporovány hlavními výrobci chytrých telefonů.

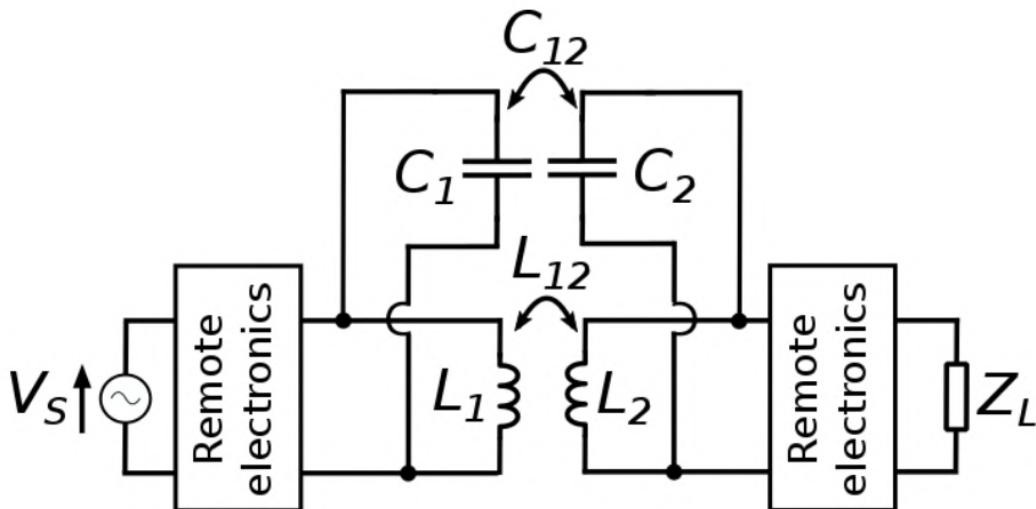
Hybridní přenos bezdrátové energie

Bezdrátový přenos energie pomocí blízkých polí (WPT) může využít dvou principů [23]:

- Bezdrátový přenos energie indukci (IPT), používá vázaných induktorů, dvou cívek a magnetického pole měnící se v čase jako média.
- Bezdrátový přenos energie kapacitou (CPT), používá vazbu kapacit, k přenosu energie z vysílací desky na přijímací desku. Médium umožňující přenos je elektrické pole měnící se v čase.

Technologie IPT může být považována za relativně vspělou. Proto již široká škála použití IPT vstoupila na trh. Nejvíce známá je přenosná elektronika a domácí zařízení (např. elektrické kartáčky, chytré telefony, chytré hodinky). Použití s větší energetickou náročností je v oblasti průmyslové automatizace a elektrických vozidel.

Adaptace technologie CPT zaostává za IPT. Roste snaha výzkumu a vývoje CPT technologie, hlavně pro použití v elektrických vozidlech [23]. Zatím se CPT technologie komerčně nepoužívá.



Obrázek 2.7: Schéma obecného hybridního WPT obvodu, s paralelní topologií IPT a CPT, převzato z [23].

Z oblasti výzkumné komunity je navrhováno bezdrátové napájení pomocí hybridní vazby. Hybridní vazba zahrnuje použití zároveň magnetického a elektrického blízkého pole k přenosu energie [23]. Vysílač i přijímač používají zároveň vázané induktory a kapacitory. Obrázek 2.7 ukazuje příklad hybridního systému. Energie je přenášena bezdrátově ze zdroje V_S ke spotřebiči Z_L pomocí svázaných indukcí L_1 a L_2 se společnou indukčností L_{12} a pomocí svázaných kapacit C_1 a C_2 s vzájemnou kapacitou C_{12} . Vzdálená elektronika (remote electronics) je přítomná v jakémkoliv praktickém WPT systému k vytvoření rezonance a zlepšení přenosu energie (obsahuje například kompenzační obvod, energetický převodník, usměrňovač).

Hybridní systém má několik vylepšení oproti IPT nebo CPT systémům:

- u IPT nebo CPT systémů jde zvýšit množství přenesené energie zvětšením cívek nebo zvětšením ploch desek. Nicméně v praktických aplikacích to většinou není možné kvůli limitům velikosti. Použití magnetického a elektrického pole zároveň umožní přesun většího množství energie za použití stejného prostoru. Nebo umožňuje použití menšího vysílače a přijímače při stejném množství přenesené energie.
- K vytvoření rezonačních obvodů se používá kombinace induktorů a kapacitorů. Proto může být výhodné využít potenciál již existujících komponent k přenosu energie. Tím zvýšit propustnost celého WPT systému.

2.2 Bezdrátová komunikace

V dnešní době je běžné mít vestavěné systémy s komplexní funkcionalitou, jako například přidání DSP, multimediálních procesorů a síťových komponent. Další fází je vznik distribuovaných vestavěných systémů, často nazývaný propojené vestavěné systémy, kde propojené značí důležitost síťové architektury a komunikačních protokolů. Propojený vestavěný systém je uskupení prostorově nebo funkčně distribuovaných vestavěných uzlů, propojených pomocí drátové nebo bezdrátové komunikační infrastruktury a protokolů, interagující s okolním prostředím (pomocí senzorů a aktuátorů) a mezi sebou [54]. Možná také interagují s hlavním uzlem, vykonávajícím řídicí činnost ke koordinaci výpočtu a komunikace pro splnění cílů.

Propojené vestavěné systémy se objevují v řadě aplikačních domén jako automobily, vlaky, letadla, kancelářské budovy, průmyslové oblasti. Hlavní výhodou použití distribuovaných systémů je potřeba nahrazení bodového propojení (point-to-point) jednou sběrnici.

Přestože jsou drátové sítě dominantní, bezdrátová technologie poskytuje několik výhod [54]. Například v průmyslové automatizaci bezdrátové sítě zařízení (senzory a aktuátory) umožňují mobilní operaci, potřebnou pro mobilní roboty, sledovací a ovládací zařízení v nebezpečných a špatně dostupných prostředích. v bezdrátových senzor/aktuátor sítích mohou mezi sebou uzly interagovat na úrovni jeden na jednoho (peer-to-peer), nebo interagují se základnou.

2.2.1 Optická bezdrátová komunikace

Bezdrátová komunikace je uplatněna v různých systémech jako přenos dat pomocí infračerveného světla [29], v menším měřítku viditelným světlem.

IrDA

IrDA - Infrared Data Association je konsortium poskytující standardy bezdrátové komunikace (nejen IR). Řeší jak hardwarovou specifikaci, tak i specifikaci dat a jejich kódování. Poskytuje například specifikaci IrDA SIR Data specification - Serial Infrared Physical Layer Link, sloužící pro obecný přenos dat pomocí IR, s možností použití UART. [1]

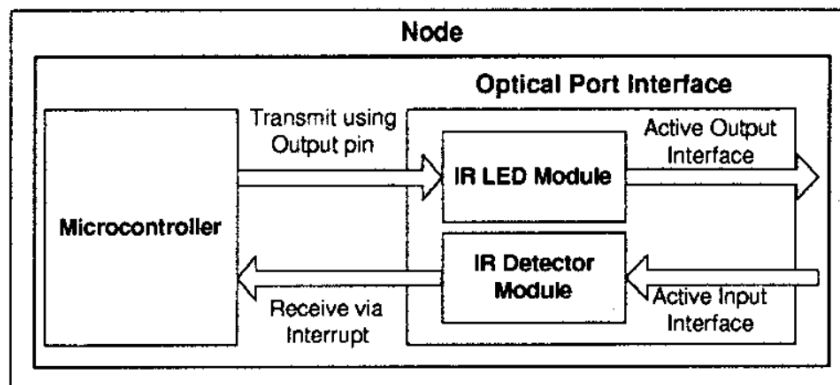
PIM-ASCII100

Infračervená bezdrátová komunikace mezi uzly na blízkou vzdálenost je možná pomocí kódování PIM-ASCII100, které je založeno na Pulse Position Modulation (PPM) kódování dat. Je určeno pro rychlou, energeticky nenáročnou a spolehlivou IR bezdrátovou komunikaci s jednoduchou, minimální a levnou hardwarovou implementací [32].

Hlavními problémy designu přenosných IR komunikačních zařízení je propustnost, cena, velikost a spotřeba energie. Propustnost značí míru dat za čas, která lze přenést dalšímu uzlu. K dosažení vyšších propustností je potřeba komplexnější, tím dražší hardware pro zpracování dat. Spotřeba udává množství energie spotřebované při vyzařování IR a je přímo úměrná napájecímu proudu. Velikost proudu závisí na způsobu kódování dat a době trvání pulzů. Obecně se doba pulzů zkracuje, tím se redukuje spotřeba energie a umožní to IR LED být overdriven (Pouštění LED velmi velkých proudů po velmi malou dobu, tím dosažení velmi intenzivních záblesků).

Oproti IrDA-4PPM, 8PPM, 16PPM [1], kde jsou data kódovaná v rámci pevné šířky, u PIM-ASCII100 jsou data kódovaná časem mezi dvěma pulzy. Data jsou kódovaná upravenou verzí PPM, kde data jsou symboly oproti běžným binárním bitům. Přenášením symbolů se docílí vyšší propustnosti a menší spotřebované energii [32]. Symboly jsou kódovány ASCII a minimální čas mezi dvěma impulzy je $100\mu\text{sec}$ (TMin). Je to upravená verze PPM, nazvaná Pulse Interval Modulation - ASCII 100. Hodnota TMin je empirická a je možné ji změnit podle požadavku na propustnost a schopností hardware.

Typický komunikační uzel používající PIM-ASCII100 může být jednoduše implementován použitím mikrokontroléru s výstupním pinem, pinem s přerušením a časovačem, jak je zobrazeno na obrázku 2.8.

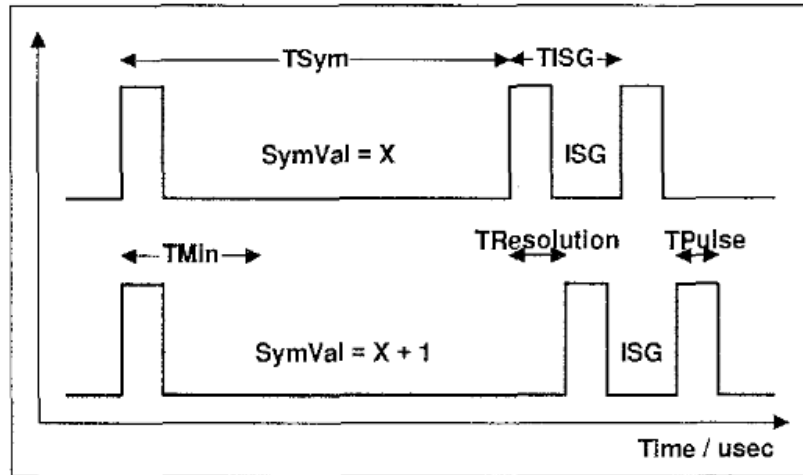


Obrázek 2.8: Typický uzel používající PIM-ASCII100, převzato z [32].

Mikrokontrolér je výstupním pinem přímo připojen k IR LED modulu a pinem přerušení k modulu IR detektoru. Signály na těchto pinech jsou formátu PIM-ASCII100 a jsou elektrickými analogy optických signálů.

Taková implementace komunikačního uzlu nepotřebuje UART, SCI a jiný proprietární hardware, tudíž je použitý mikrokontrolér jednoduchý a levný, tím je i nízká cena.

PIM-ASCII100 kód Typický průběh je zobrazen na obrázku 2.9, lze vidět symboly a mezi symbolovou mezeru (ISG - Inter Symbol Gap) mezi každým symbolem.



Obrázek 2.9: Průběh PIM-ASCII100, převzato z [32].

Obrázek 2.9 ukazuje parametry spojené s PIM-ASCII100.

SymVal je definován jako číselná hodnota symbolu. ISG je mezeru mezi symboly. TSym je čas mezi dvěma následujícími pulzy a značí platný symbol. TSym je vypočítán jako:

$$TSym = TMin + (SymVal * TResolution) \quad (2.9)$$

Pro validní symbol musí platit podmínka:

$$TSym \geq TMin \quad (2.10)$$

TMin je nejmenší hodnota TSym. TISG je čas mezi dvěma následujícími pulzy, které znázorňují ISG a musí platit podmínka:

$$TISG < TMin \quad (2.11)$$

V TISG intervalu mikrokontrolér dekóduje poslední přijatý symbol. Proto musí TISG splňovat následující podmínku:

$$TISG > \text{Čas dekódování symbolu} \quad (2.12)$$

TResolution je časový rozdíl rozlišující dva symboly. TPulse je čas jednoho pulzu.

2.3 Optické senzory

Zařízení měřící absolutní vzdálenost jsou důležitým evolučním krokem v průmyslových zemích, používané pro nedestruktivní testování, reverse engineering, prediktivní údržbu nebo

virtuální realitu [3]. Mají potenciál zvýšit produktivitu firem nebo kvalitu výrobků. Hlavně o bezkontaktní měření vzdálenosti hrbolatých cílů je velký zájem v průmyslových aplikacích.

Základním principem aktivního bezkontaktního měření vzdálenosti je vrhat signál (rádiový, ultrazvukový nebo optický) na objekt a následně zpracovat odražený signál ke zjištění vzdálenosti [3]. Pokud je potřeba vysoká přesnost, je potřeba optický zdroj, protože rádiové a ultrazvukové nejdou dostatečně zaostřit.

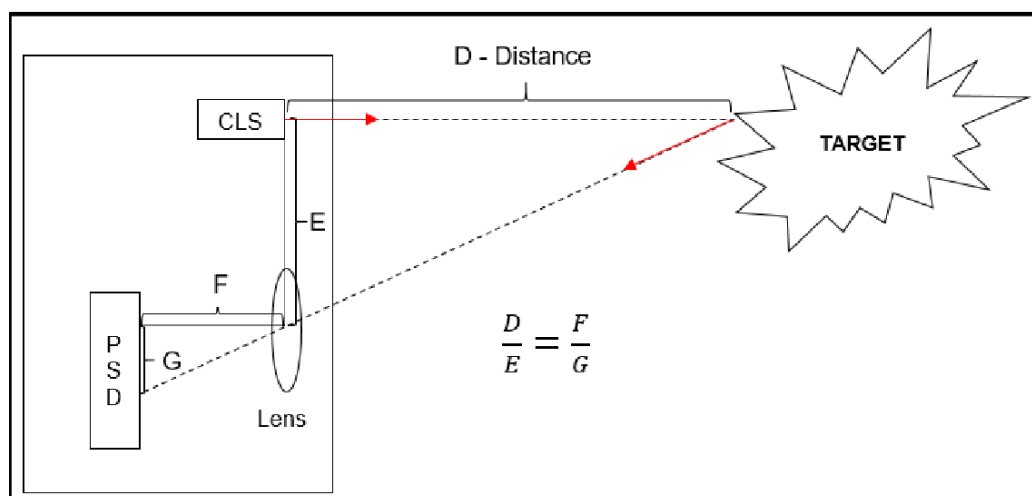
2.3.1 Měření vzdálenosti pomocí laseru

Optické metody měření vzdálenosti je možno rozdělit do tří kategorií: interferometrie, čas letu (telemetrie) a triangulační metody [9, 3].

Optická triangulace

Triangulace je proces, který umožňuje zjistit vzdálenosti nebo pozice objektů pomocí úvah založených na geometrii podobných úhlů. Triangulace se často používá pro měření vzdáleností. Optický senzor založený na triangulaci je jednoduchou ukázkou této metody [53].

Kolimovaný zdroj laseru (CLS) je použit k nasvětlení cíle měření. Odražené světlo od cíle je detekováno přijímacím systémem umístěným vedle zdroje laseru, tvořeným například čočkou a detektorem citlivého na polohu (PSD). Jak je vidět na obrázku 2.10, vzdálenost k cíli je definovaná podobou vytvořeného trojúhelníku [53]. Takové senzory typicky měří vzdálenosti mezi 10 mm a 1 m [9]. Detektor může být například CCD fotodetektor a polohu určuje pixel [3, 53].



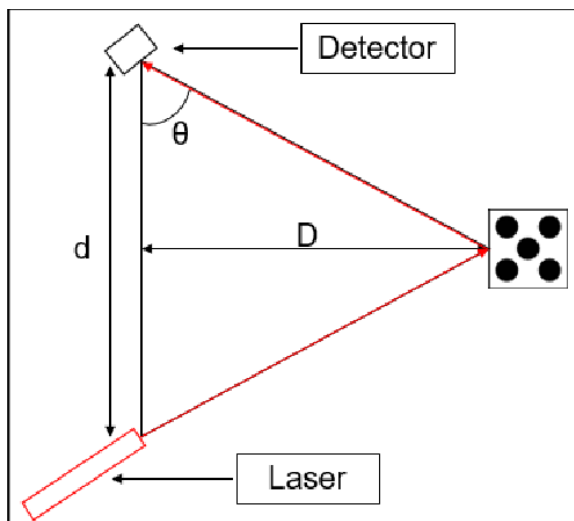
Obrázek 2.10: Triangulační metoda, převzato z [9].

V tomto případě je vzdálenost D vy počítána jako:

$$D = \frac{D \times E}{G} \quad (2.13)$$

Vzdálenosti E a F jsou známy, změřením hodnoty G (pomocí PSD), lze dopočítat vzdálenost D.

Na obrázku 2.11 je popsán trigonometrický vztah:



Obrázek 2.11: Triangulační metoda, trigonometrický vztah (úhly), převzato z [9].

$$\tan\theta = \frac{D}{d/2} = \frac{2D}{d} \quad (2.14)$$

Protože je vzdálenost d konstantní, pro každý měřený úhel θ (pomocí detektoru), jde dopočítat vzdálenost D . Výpočet vzdálenosti je dán jako:

$$D = \frac{d \cdot \tan\theta}{2} \quad (2.15)$$

Pulzní telemetrie

Je metoda založená na určování času, který zabere cesta pulzu energie z vysílače k cíli a pak zpět k detektoru [9]. Obrázek 2.12 ukazuje schéma systému, který měří vzdálenost metodou pulzní telemetrie.

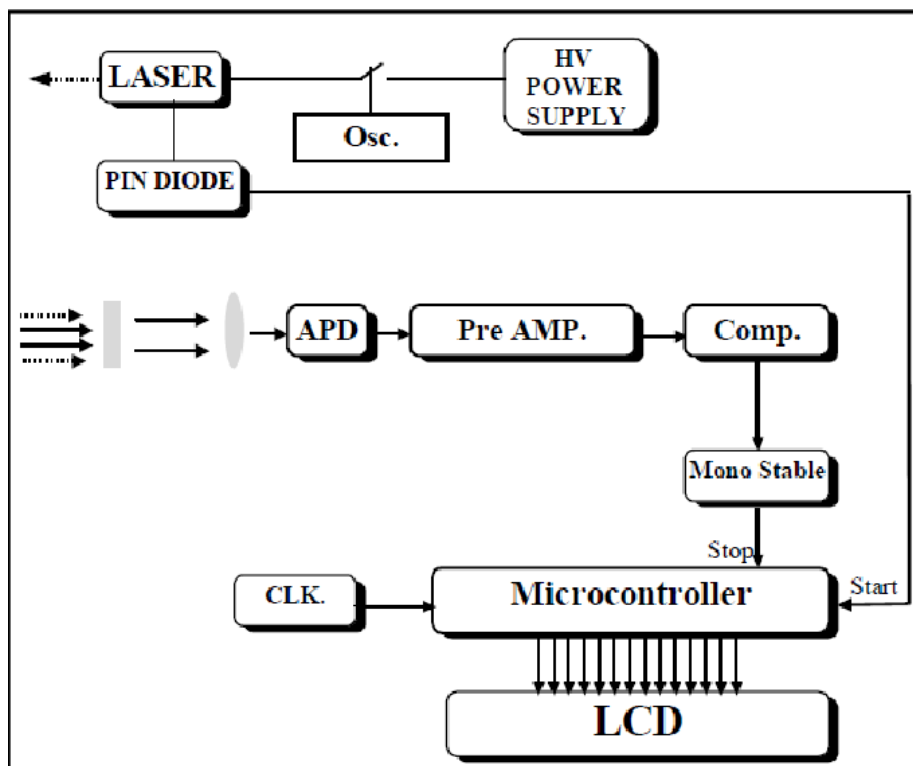
Jak lze vidět na obrázku 2.12, když je zachycen startovní signál, spustí se čítač, který se následně zastaví signálem stop. Potom co urazí vzdálenost $2D$, laserový paprsek vstoupí do fotodiody (APD), generující elektrický signál, který je zesílen. Signál pak působí na mikrokontrolér, zastavuje čítač. Vzdálenost mezi objektem a vysílačem je dána 2.16, kde f_{clk} je frekvence hodin a N je počet číslic napočítaných mezi počátečním signálem a konečným signálem.

$$D = \frac{N \cdot c}{2f_{clk}} \quad (2.16)$$

Pomocí frekvence hodin je možné vypočítat čas potřebný k přičtení čítače. Systém ukázaný na obrázku 2.12 má frekvenci hodin 30 MHz. Čas (T) mezi inkrementy čítače (perioda hodin) je dán:

$$T = \frac{1}{f_{clk}} = \frac{1}{30 \times 10^6} = 33, (3)ns \quad (2.17)$$

Pomocí vypočítaného T je možné vypočítat nejistotu měření systému. Rychlostí světla (c), časem T urazí vzdálenost (D_{inc}), vypočítáno jako:



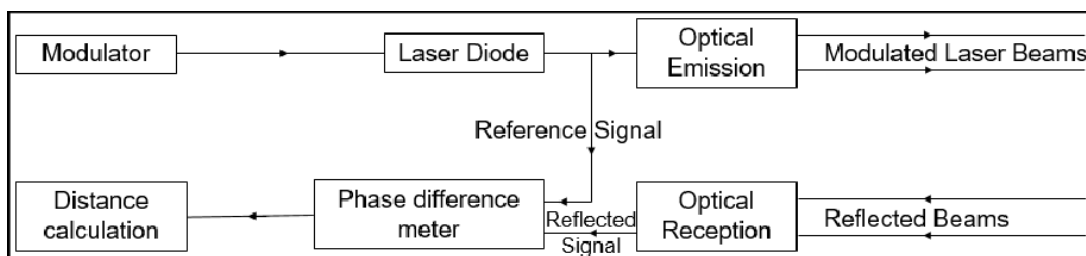
Obrázek 2.12: Schéma použití metody pulzní telemetrie, převzato z [9].

$$D_{inc} = c \times T = 10m \quad (2.18)$$

Takže chyba čítače může být až 10 m pro cestu pulzu tam a zpět, takže nejistota je polovina této hodnoty, 5 m. Pomocí 2.16 je vypočítána vzdálenost, je to jednoduchá a užitečná metoda pro měření velké vzdálenosti, pro malé vzdálenosti má nezanedbatelnou chybu [9].

Telemetrie porovnání fází

Je metoda, která moduluje laserový paprsek intenzitou nebo frekvencí a pošle ho k cíli [9]. Aby bylo možné porovnat fáze, je referenční laserový paprsek poslán přímo do měřáku porovnávajícího fáze. Obrázek 2.13 ukazuje schéma metody.



Obrázek 2.13: Schéma použití metody telemetrie porovnání fází, převzato z [9].

Budiž ν_M modulační frekvence paprsku, intenzita paprsku je dána:

$$I_E = I_0(1 + \cos 2\pi\nu_M t) \quad (2.19)$$

Signál se vrací v čase $2D/c$, kde D je vzdálenost, kterou chceme zjistit. Intenzita odraženého paprsku je dána:

$$I_E = I_0(1 + \cos 2\pi\nu_M(t - \frac{2D}{c})) \quad (2.20)$$

Pak je fázový posun dán:

$$\Delta\phi = 4\pi\nu_M \frac{D}{c} \quad (2.21)$$

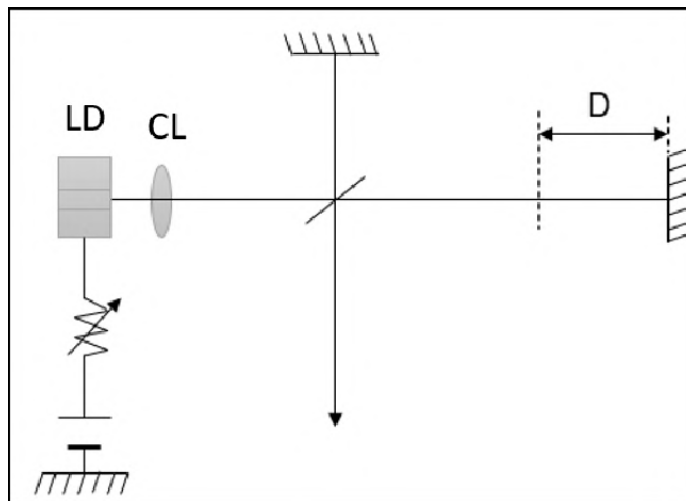
Vzdálenost D je vyjádřena:

$$D = \frac{c(\Delta\phi + 2k\pi)}{4\pi\nu_M} \quad (2.22)$$

Inferometrie

Je metoda, která umožňuje velmi přesné měření. Vzdálenost je měřena pomocí fázového rozdílu mezi dvěma vlnami, kde jedna vlna je známá[9]. Existuje několik inferometrů, například Michelsonův inferometr, Fabry-Perot inferometr a Mach-Zehnder inferometr.

Michelsonův inferometr je založen na rozdělení světelného paprsku na dvě cesty. Po odražení od cíle jsou odražené paprsky znovu spojeny v detektoru, kde produkují interferenční obrazec. Obrázek 2.14 ukazuje funkci tohoto interferometru, kde zdroj záření je laserová dioda.



Obrázek 2.14: Michelsonův inferometr, převzato z [9].

V příkladu na obrázku je světlo vyzářené laserovou diodou (LD) kolimované čočkou a směřované k Michelsonovu inferometru. Rozdíl fází dvou paprsků je určen pomocí detektoru, z tohoto rozdílu je vypočítán rozdíl vzdáleností ramen.

Rozdíl L mezi cestami dvou ramen interferometru je dvakrát vzdálenost D , kterou chceme změřit. Příslušný rozdíl fází je vypočítán pomocí 2.23, kde λ je vlnová délka laserového světla.

Porovnání rozsahů měření		
Metoda	Vzdálenost	Nejistota měření
Triangulace	$10^{-5} - 10^1$	$1\mu m$
Pulzní telemetrie	$1 - 10^3$	$5m @ f_{clk} = 30MHz$
Telemetrie rozdílu fází	$10^{-3} - 1,5$	$0,557mm @ \nu_M = 30MHz$
Inferometrie	$10^{-9} - 10^{-5}$	$0,15\mu m$

Tabulka 2.1: Porovnání rozsahů měření, převzato z [9].

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi L}{\lambda} \quad (2.23)$$

Vlnová délka se změní změnou proudu laseru z λ na $\lambda + \Delta\lambda$. Fázový rozdíl se pak taky změní:

$$\Delta\Phi = 2\pi L \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda + \Delta\lambda} \right) \quad (2.24)$$

Pokud je poměr změny vlnové délky k vlnové délce minimální, fázový rozdíl lze aproximovat následovně:

$$\Delta\Phi \cong 2\pi L \frac{\Delta\lambda}{\lambda^2} \quad (2.25)$$

Protože λ a $\Delta\lambda$ jsou známé, požadovanou vzdálenost můžeme zjistit podle rozdílu mezi cestami dvou ramen interferometru jako:

$$D = \frac{L}{2} \cong \frac{\Delta\Phi\lambda^2}{4\pi\Delta\lambda} \quad (2.26)$$

Vlnová délka laseru se mění podle elektrického proudu (0,005 nm/mA) a teploty (0,04 nm/°C) [9].

2.4 Elektromotory

Elektromotor je elektrická součástka využívající elektromagnetické (Lorentzovy) síly k pohybu, která umožňuje věci jako úchop robotické ruky, pohyb elektrického auta nebo let dronu [28]. Prvním elektromotorem je Jedlíkův elektromotor, který Jedlík zkounstrooval v roce 1827. Jedlíkův elektromotor je stále velmi podobný dnešním elektromotorům. Je založený na cívkách v magnetickém poli. Jak se elektrický proud procházející cívkou mění, tak se cívka otáčí.

2.4.1 Struktura elektromotoru

Z vnějšku se skládá z pouzdra, hřídele a vodičů. Pouzdro je vnější obal motoru. Hřídel je kovová tyč vycházející ze středu motoru. Vodiče přivádějí elektřinu k motoru. Jakmile se přivede napájení skrze vodiče, motor začne běžet a hřídel se začne otáčet. Existují ovšem i elektromotory, které mají fixní hřídel a jejich pouzdro se otáčí.

Vnitřní struktura se dá popsat mechanicky nebo elektricky [28]. Mechanicky se skládá ze statoru a rotoru. Stator je část, která zůstane na místě a rotor je část, která se pohybuje.

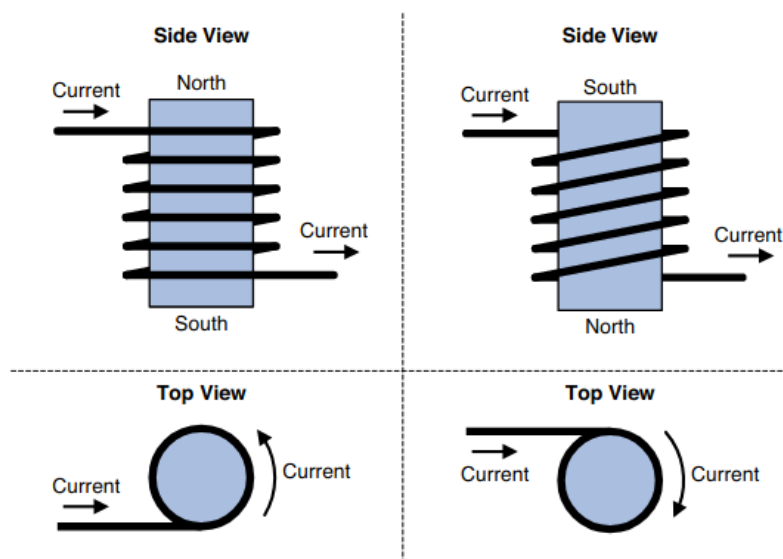
Mezera oddávající stator a rotor se nazývá vzduchová mezera. Elektricky je složena z armatury, části, která dostává elektrický proud a polní magnet, část vytvářející magnetické pole. Pokud se nejedná o permanentní magnet, ale o elektromagnet, je nazývána polní vinutí.

Permanentní magnety a elektromagnety jsou hojně používány v konstrukci elektromotorů. Pro oba druhy platí magnetické vlastnosti jako:

- Magnet má dva póly: severní (N - north) a jižní (S - south).
- Opačné póly se přitahují a stejné póly se odpuzují.
- Různé magnety mají jinou magnetickou sílu. Čím je magnet silnější, tím víc bude ostatní magnety přitahovat a odpuzovat.

Rozdíl mezi magnety je následující. Permanentní magnety nepotřebují elektrický proud k vytvoření magnetického pole a zároveň jsou obvykle silné. Jejich magnetické póly jsou ovšem fixní a také jsou drahé.

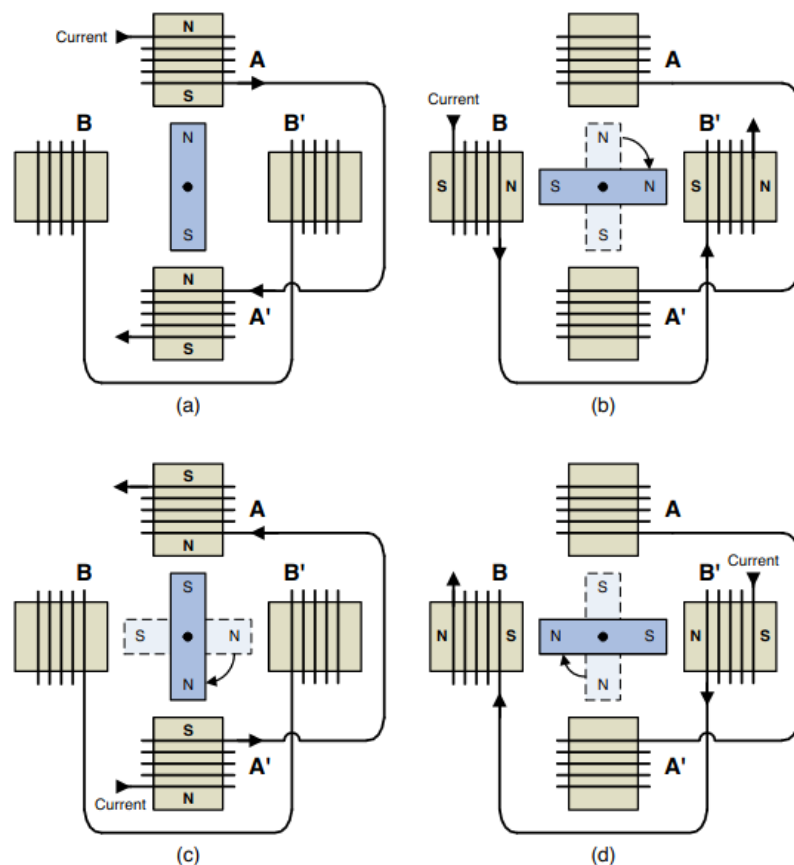
Magnetické pole elektromagnetů jde měnit podle elektrického proudu procházejícího elektromagnetem. Takže změnou elektrického proudu jde měnit síla magnetického pole a jeho polarita (poloha pólů). Nevýhodou je spotřeba energie, pro vytvoření magnetického pole srovnatelného silou s permanentním magnetem je potřeba vysokých elektrických proudů. Nicméně možnost měnit magnetické pole je klíčová k funkci elektromotorů.



Obrázek 2.15: Elektromagnety a jejich póly, převzato z [28].

Obrázek 2.15 ukazuje změnu polaritu podle směru elektrického proudu v cílce. Obrázek ukazuje elektromagnet, do kterého z vrchu vchází elektrický proud a ze spodu vychází. Rozdíl spočívá ve směru vinutí, které je jednou proti směru hodinových ručiček a podruhé po směru hodinových ručiček. Pokud elektrický proud teče proti směru hodinových ručiček, tak je severní pól nahoře a jižní pól dole. Pokud proud teče po směru hodinových ručiček, polarita je opačná s jižním pólem nahoře a severním dole.

Použití magnetů k sestavení elektromotoru znázorňuje obrázek 2.16. Ve středu je rotor tvořen permanentním magnetem a je schopen se volně otáčet. Kolem něj jsou čtyři elektromagnety tvořící stator. Vždy dva protější jsou navzájem spojeny. Máme tedy vždy dva



Obrázek 2.16: Experiment se čtyřmi elektromagnety, převzato z [28].

spojené elektromagnety označené jako A, A' a B, B'. Elektromagnety jsou spojené tak, aby jedním vstupoval elektrický proud a druhým vystupoval. Zároveň jsou spojeny tak, aby proti sobě měly odlišné póly. Jak je vidět na obrázku, jsou čtyři možnosti zmagnetování elektromagnetů. Vždy po zmagnetování je permanentní magnet přitahován opačnými póly elektromagnetů a tudíž se za nimi otočí. Pokud je elektrický proud pouštěn v pořadí jak je zobrazeno na obrázku (a,b,c,d), tak se motor otočí o 360° [28]. Tohle je proces změny elektrické energie na mechanickou energii.

2.4.2 Přehled elektromotorů

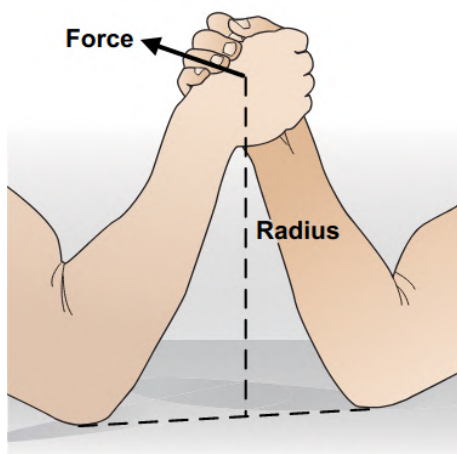
Elektromotory lze rozdělit podle druhu napájení na motory používající střídavý proud (AC) nebo stejnosměrný proud (DC). Existují i univerzální elektromotory, které dokáží použít jak střídavý, tak stejnosměrný proud [28]. Další rozdělení je podle druhu pohybu. Většina motorů je rotační, ale jsou i lineární motory. Pro přesný pohyb se používají servomotory a krokové motory. Různé druhy motorů budou probrány dále.

2.4.3 Vlastnosti elektromotorů

Hlavními vlastnostmi elektromotorů jsou kroutivý moment a úhlová rychlost.

Síla způsobuje změnu rychlosti objektu, ať už zrychlení nebo zpomalení. Síla jde vypočítat jako hmotnost předmětu krát zrychlení nebo zpomalení. Příkladem je gravitační síla. Pokud zvedneme objekt nad zem a pustíme ho, začne padat, zrychlovat působením gravitační síly směrem k zemi. Gravitační síla objektu se nazývá váha. Síla se počítá v Newtonech (zkratka N), kde 1N je síla nutná ke zrychlení 1kg hmoty o 1 metr za vteřinu ($1m/s^2$). Síla vždy působí v přímce, i když se její směr může měnit.

Dvě základní vlastnosti elektromotorů jsou kroutivý moment a úhlová rychlost. Kroutivý moment stejně jako síla znázorňuje zrychlení nebo zpomalení objektu na základě jeho hmotnosti. Rozdíl oproti síle je ve směru působení, který je pro kroutivý moment kruhový oblouk a ne přímka. Kroutivý moment působí například při šroubování.[28]



Obrázek 2.17: Síla, poloměr a kroutivý moment, převzato z [28].

Obrázek 2.17 znázorňuje kroutivý moment na příkladu zápasu v páce. Každý účastník se snaží vynaložit větší kroutivý moment než protivník. Pokud uspěje, rozdíl kroutivých momentů bude tlačit protivníkovu ruku ke stolu. Čím větší rozdíl v kroutivých momentech, tím rychleji se ruka dostane ke stolu.

Podobná situace je u rotačních motorů. Motor vynaloží kroutivý moment skrze hřídel, která je připojena k zátěži. Pokud motor vynaloží dostatečně velký kroutivý moment, hřídel bude otáčet zátěž. Pokud ale nedokáže vynaložit dostatečný kroutivý moment, hřídel se točit nebude.

Kroutivý moment působí v kruhovém oblouku, takže se skládá z poloměru a síly působící v přímce kolmé na poloměr (znázorněno na obrázku). Výpočet kroutivého momentu τ (tau) pomocí síly (F) a poloměru (r) je dána jako:

$$\tau = rF \quad (2.27)$$

Kroutivý moment je udáván v Newton-metrech, zkráceně N-m. N-m znamená počet Newtonů (síly) na poloměr 1 metru. Jsou používány i jednotky jako Newton-milimetr a Newton-centimetr.

Kroutivý moment vynaložený motorem závisí na zátěži [28]. Analogicky se zápasem v páce, pokud je protivník výrazně slabší, bude poražen bez námahy. Takovému stavu se říká no-load. Pokud je motor v no-load stavu, hřídel se točí rychle a motor vynaloží minimální kroutivý moment. Pokud je protivník silnější, nezáleží jak velký kroutivý moment

vynaložíme, protivníková ruka se nepohne. Takový stav se nazývá stall. Když je motor ve stall stavu, vynaloží obrovský kroutivý moment, ale hřídel se nepohne, protože zátěž je moc velká.

Rychlost udává jak rychle se objekt pohybuje. Jinými slovy jakou vzdálenost urazí za jednotku času. Úhlová rychlost je podobná, ale udává úhel, o který se objekt otočí za jednotku času. Úhly se udávají v radiánech a stupních. Úhlová rychlost se udává v radiánech za vteřinu, stupních za vteřinu a otáčkách za minutu (RPM). u elektromotorů se používají nejvíce stupně a otáčky za minutu. Úhlová rychlost se značí ω a její otáčky za minutu se dají spočítat následovně. Pro objekt, který se otáčí rychlostí 12° za sekundu:

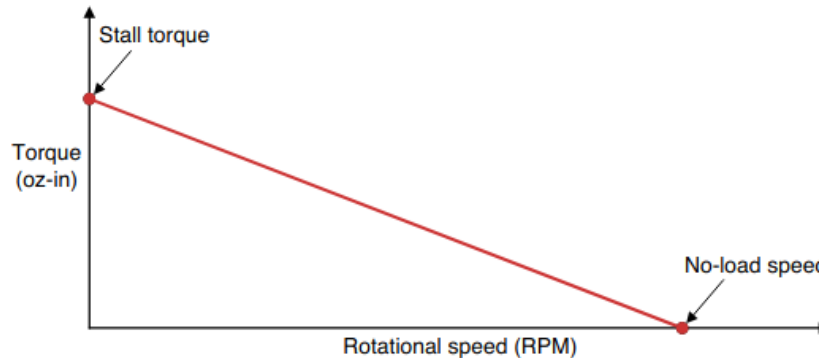
$$w = \frac{12deg}{sec} \cdot \frac{60sec}{1min} \cdot \frac{1}{360deg} = 2otáčky/min = 2RPM \quad (2.28)$$

Torque-speed curve

Pokud motor není zatížen, rychlost motoru je nazývána no-load rychlost, označována ω_n . Pro většinu motorů to je jejich nejvyšší rychlost.

Pokud je motor zatížen tak, že se jeho hřídel netočí, kroutící moment motoru se nazývá stall kroutící moment, označovaný jako τ_s . Určuje nejvyšší kroutící moment motoru.

Při výběru motoru jsou tyto údaje důležité. Výrobci motorů udávají jak ω_n a τ_s , tak uvádí jak se motor chová mezi těmito extrémy. Uvádí to graficky křivkou závislosti rychlosti na kroutivém momentu (anglicky torque-speed curve). Obrázek 2.18 ukazuje jednoduchý příklad této křivky. [28]



Obrázek 2.18: Příklad Torque-speed křivky, převzato z [28].

Elektrické ztráty

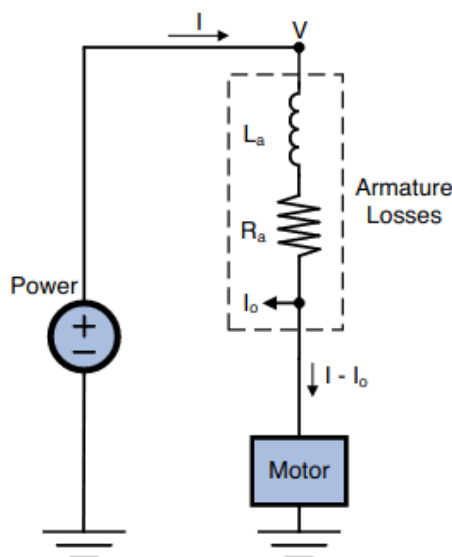
I když se elektromotor otáčí bez zátěže, pořád v něm proudí elektrický proud. Takový proud se nazývá no-load proud, značený I_o . Elektrický proud je potřeba ke zmagnetování železných jader elektromagnetů, nazývá se železná ztráta.

Další zdroj ztrát je takzvaná měděná ztráta, daná odporem měděných drátů tvořících cívky (odpor armatury), označovaný R_a . Podle Ohmova zákona je na armatuře úbytek napětí rovný $V - (I - I_o)R_a$. To je napětí, které přispívá k funkci elektromotoru, kde v a I jsou vstupní veličiny.

Navíc kromě odporu přispívá armatura ke ztrátám induktancí, značená L_a . Induktance je většinou malá a je závislá na frekvenci procházejícího proudu. Induktance tak může mít velký dopad, pokud je motor zapojený ve vysokofrekvenčním obvodu.

Většina elektromotorů mají železná jádra, ale ne všechny. Motory bez železných jader se nazývají bezjádrové (coreless) nebo také motory se vzdušným jádrem. Takové motory jsou slabší, ale jsou lehčí a mají menší ztráty. [28]

Obrázek 2.19 ukazuje elektronický obvod ekvivalentní motoru, který bere v úvahu elektrické ztráty motoru.



Obrázek 2.19: Ekvivalentní obvod se ztrátami na armatuře, převzato z [28]

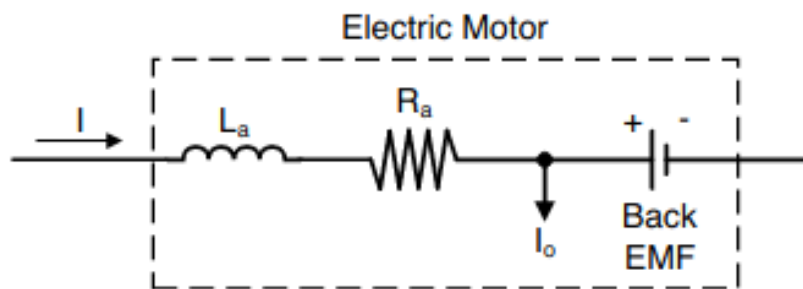
Back-EMF

Jak se motor otáčí, interakce vodičů a magnetů generuje napětí úměrné rychlosti rotace [28]. Pokud je tato rotace způsobena vnější silou, generuje elektrickou energii, z motoru je generátor. Pokud ale motor rotuje pomocí elektrického proudu, tak generované napětí jde proti směru proudu a je nazýváno Back-EMF (zpětná elektromotorická síla). Back-EMF roste se vstupním napětím, ale nikdy ho nepřesáhne. Back-EMF se využívá u BLDC motorů ke zjištění úhlu hřídele, více je o tom v kapitole o BLDC motorech. Obrázek 2.20 ukazuje obvod motoru i s ohledem na Back-EMF.

Efektivita

Je další důležitou vlastností motorů. Elektromotory dokáží pracovat v rozsahu křivky krouťivého momentu na rychlost. Každý motor má operační bod nejvyšší efektivity [28], kdy motor nejlépe převádí elektrickou energii na mechanickou za nejnižších ztrát. Efektivita je založena na dalších konceptech jako je výkon, příkon, práce.

Práce je provedena kdykoliv síla působí na objekt a posune ho o nějakou vzdálenost. Pokud je směr síly a uražené vzdálenosti stejný, výsledná práce je jejich násobkem. Takže



Obrázek 2.20: Ekvivalentní obvod elektromotoru, převzato z [28].

síla F a vzdálenost d ve stejném směru jako síla F , vykonaná práce W je daná jako Fd . Pokud spadne objekt vážící 20N z výšky 2 metrů, práce vykonaná gravitační silou je $40\text{N}\cdot\text{m}$. Pokud se ale objekt nepohne nebo je jeho pohyb kolmý ke směru síly, práce vykonaná danou silou je 0 .

Rotační práce je podobná, ale zahrnuje kroutivý moment a úhel. Pokud kroutivá síla τ otočí objektem o úhel θ , výsledná práce je rovna $\tau\theta$.

Výkon je tempo jakým je práce vykonána. Pokud je práce konstantní pro daný interval času, výkon je práce dělená časem. Matematicky vyjádřeno jako výkon označován P , práci jako W a čas jako t :

$$P = \frac{W}{t} \quad (2.29)$$

Pokud máme dvě elektrické vrtačky vykonávající stejnou práci, ale první vykoná práci za poloviční čas, první vrtačka je dvojnásobně výkonná jako druhá vrtačka. [28]

Výkon je měřen ve wattech, zkráceně W , kde 1W se rovná $1\text{N}\cdot\text{m}/\text{s}$. Dalšími jednotkami je kW (1000W) a koňská síla ($745,7\text{W}$).

Příkon se rovná napětí krát proud. Pokud označíme napětí V , proud i a výkon P , výsledná rovnice je dána jako:

$$P_{\text{electrical}} = VI \quad (2.30)$$

Rovnice počítá s napětím měřených ve voltech a proudem v ampérech a značí spotřebovanou energii.

Elektromotory mají ztráty napětí, kvůli odporu armatury a ztrátu proudu, kvůli železným ztrátám. Pokud vezmeme tyto ztráty v potaz, energie motoru bude:

$$P_{\text{motor}} = (V - IR_m)(I - I_o) \quad (2.31)$$

Výraz znázorňuje elektrickou energii, kterou motor úspěšně převede na mechanickou energii. Mechanický výkon se rovná kroutivému momentu τ , násobeného rychlostí ω . Pokud dáme rovnost elektrického a mechanického výkonu dostaneme:

$$(V - IR_m)(I - I_o) = \tau\omega = P_{\text{mechanical}} \quad (2.32)$$

Žádný motor nepřevéde všechnu vstupní elektrickou energii na mechanickou energii. Poměr mezi vstupním výkonem (příkonem) a výstupním výkonem je nazýván efektivita, značený η . Efektivitu můžeme získat rovnicí:

$$\eta = \frac{P_{vystup}}{P_{vstup}} \quad \text{neboli} \quad \eta = \frac{vykon}{prikon} \quad (2.33)$$

Ideální elektrický motor má efektivitu 1. Reální motory mají běžně efektivitu mezi 0,9 a 0,5 [28]. Pokud motor produkuje výkon 1,5 W mechanické energie a jeho příkon je 2 W vstupní elektrické energie, jeho efektivita je $1,5/2 = 0,75$.

Efektivita pro elektrické motory lze spočítat jako:

$$\eta = \frac{P_{vstup}}{P_{vstup}} = \frac{P_{mechanick}}{P_{elektrick}} = \frac{\tau\omega}{VI} \quad (2.34)$$

Použitím rovnic z dřívějšího lze vyjádřit rovnici jako:

$$\eta = \frac{P_{mechanick}}{P_{elektrick}} = \frac{(V - IR_m)(I - I_o)}{VI} = \left(\frac{V - IR_m}{V}\right)\left(\frac{I - I_o}{I}\right) \quad (2.35)$$

Efektivita roste, jak roste napětí a odpor motoru klesá [28]. Proto mají většinou vysoko výkonové motory větší efektivitu než nízko výkonové. Vztah proudu a efektivity je složitější. Růstem proudu roste odpor mědi (IR_m), tím se snižuje efektivita. Růstem proudu se zároveň snižuje efekt ztrát v železe (I_o), což zvyšuje efektivitu.

Mnoho výrobců specifikují parametry nejvyšší efektivity motoru. To je důležité při výběru motoru, vybrat motor s těmito parametry co nejlépe požadovanému úkolu.

Neefektivita motoru se projevuje nejen nevyužitou energií, ale i přeměnou v teplo, rovno I^2R_m [28]. Pokud se motor přehřeje může dojít k poškození motoru a okolní elektroniky.

2.4.4 Stejnoseměrné (DC) motory

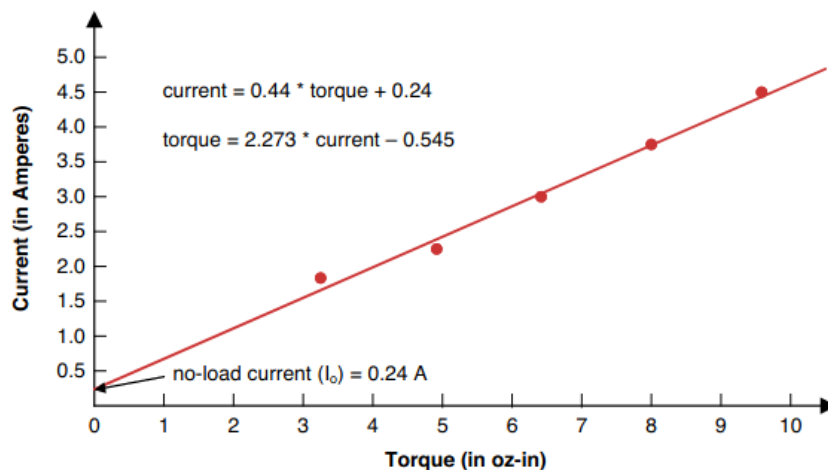
Jsou to motory napájené bateriemi, solární energií, USB a jinými zdroji stejnosměrného proudu. Stejnoseměrné motory mají následující charakteristiky:

- Kroutivý moment je proporcionální k elektrickému proudu.
- Rychlost je proporcionální k elektrickému napětí.
- Řídící elektronické obvody používají elektrické spínače pro napájení motoru.
- Ovladač řídí funkci motoru pomocí PWM (pulzní šířková modulace) signálů.

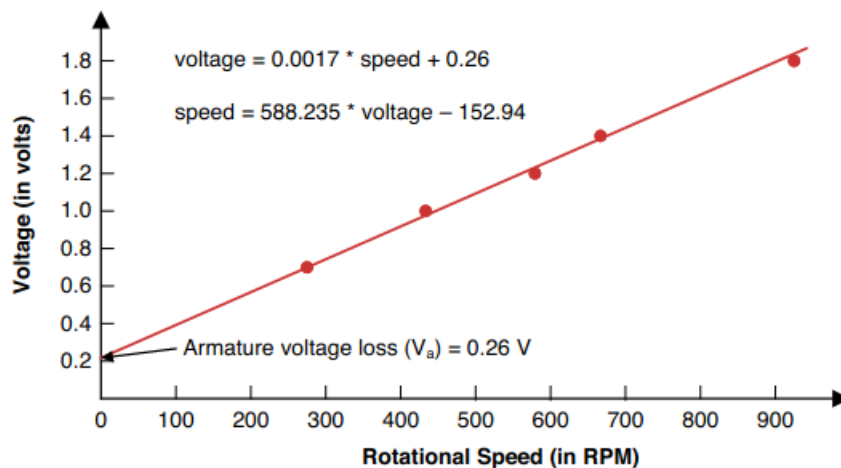
Ampérův silový zákon popisuje jak moc síly vynaloží magnetické pole na vodič. Jak se proud proudí armaturou zvyšuje, zvyšuje se kroutivý moment [28]. Závislost kroutivého momentu na proudu je zobrazena na obrázku 2.21.

Pro stejnosměrné motory můžeme tuto závislost aproximovat přímkou, tedy poměr mezi kroutivým momentem a proudem je konstantní [28]. Tato konstanta se nazývá K_t , je uváděna jako vlastnost motoru v metrických jednotkách Newton-metrech na ampér (N-m/A) nebo v imperiálních jednotkách pound-inches/ampere (lb-in/apm), ounce-inches/ampere (oz-in/amp). Na obrázku 2.21 je rovna 2,273 oz-in/amp.

Když se motor točí, ale nevydává žádný kroutivý moment, motor je v no-load stavu. Proud přijímaný motorem v no-load stavu je nazýván no-load proud, označován jako I_o . Na



Obrázek 2.21: Křivka závislosti kroutivého momentu na proudu, převzato z [28].



Obrázek 2.22: Křivka závislosti úhlové rychlosti na napětí, převzato z [28].

obrázku 2.21 je I_o roven 0,24 A. I_o je minimální proud k rozpočívání motoru. Kroutivý moment motoru je roven $K_T(I - I_o)$.

Stejně jako se kroutivý moment zvyšuje s proudem, rychlost otáčení se zvyšuje s napětím [28]. Závislost napětí a rychlosti stejnosměrných motorů znázorňuje obrázek 2.22. Stejně jako proud lze tuto závislost aproximovat přímkou. Konstanta je označována K_V a je běžně v jednotkách otáček za minutu na volt neboli RPM/V. Na obrázku se K_V rovná 588,235 RPM/V. Armatura každého motoru má odpor R_a , který způsobuje úbytek napětí V_a . Na obrázku 2.22 je roven 0.26 V. Pro vstupní napětí V se rychlost motoru rovná $K_V(V - V_a)$. Označením proudu motoru jako $I - I_o$, vypočítáme $V_a = (I - I_o)R_a$.

Pomocí elektrického proudu $(I - I_o)$ a napětí $(V - V_a)$ generuje motor mechanický kroutivý moment (τ) a rychlost (ω) následující rovnicí:

$$(V - V_a)(I - I_o) = \tau\omega \quad (2.36)$$

Vztah mezi K_T a K_V je roven:

$$K_T K_V = 1352,36 \quad (2.37)$$

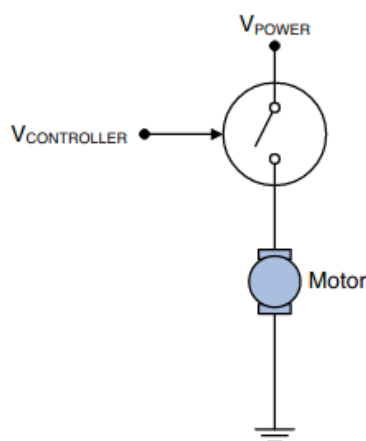
Tento vztah umožňuje:

- z jedné konstanty dopočítat druhou. Proto se většinou uvádí pouze K_V .
- Žádný motor nemůže vynikat v převodu proudu na kroutivý moment (vysoké K_T) a zároveň v převodu nazpět na rychlost (vysoké K_V). Pokud je jedno relativně vysoké, tak druhé musí být relativně nízké.
- Pokud potřebujeme motor, který je rychlý, vybereme motor s vysokým K_V a nízkým K_T . Pokud potřebujeme motor s vysokým kroutivým momentem, vybereme motor s vysokým K_T a nízkým K_V .

Průměrný motor je moc rychlý a má malý kroutící moment pro většinu aplikací [28]. Například použití motoru quadrokoptéry do robotického ramene, motor nebude mít dostatek kroutivého momentu k pohybu ramene. Proto se používá převodů mezi motor a zátěž. Převody dokáží zvýšit kroutivý moment a snížit rychlost a naopak.

Ovládání motorů Pro ovládání funkce motorů se používají řadiče motorů. v moderních systémech se jedná o integrované obvody. Mnoho zařízení používá mikrokontrolérů, které nejsou schopny dodat dostatečný proud a napětí elektromotorům [28]. Proto využívají kombinaci s elektrickými spínači jako relé a tranzistory.

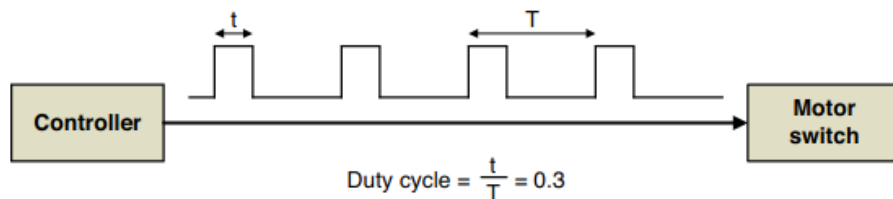
Elektrické spínače se dokáží pomocí malého proudu a napětí otevřít a sepnout větší napětí a proud, nutné pro chod elektromotoru. Mikrokontrolér ovládá elektrický spínač, tím elektromotor, jak je zobrazeno na obrázku 2.23.



Obrázek 2.23: Ovládání motoru elektrickým spínačem, převzato z [28].

Pomocí elektrického spínače lze motor zapnout nebo vypnout. Pro regulaci rychlosti mikrokontrolér používá pulzní šířkovou modulaci (PWM), pomocí které rychle zapíná a vypíná spínač po určité časové intervaly.

Obrázek 2.24 znázorňuje pulzní šířkovou modulaci. T znázorňuje periodu signálu, někdy nazýváno rámeček (frame), tedy čas mezi dvěma sousedními vzestupnými hranami. T je nastaveno kontrolérem jako PWM frekvence, tedy $1/T$.



Obrázek 2.24: Ovládání motoru pulzní šířkovou modulací, převzato z [28].

t udává časový interval, po kterém je hodnota nastavena na 1 (high). Tento časový interval se nazývá šířka pulzu (pulse width). Pracovní cyklus (duty cycle) je poměr šířky pulzu oproti celé periodě, neboli jaká část periody je v 1. Vypočítá se jako t/T . Na obrázku 2.24 je pracovní cyklus roven 0.3.

Výběr PWM frekvence je důležitý, je nutné zhodnotit následující faktory:

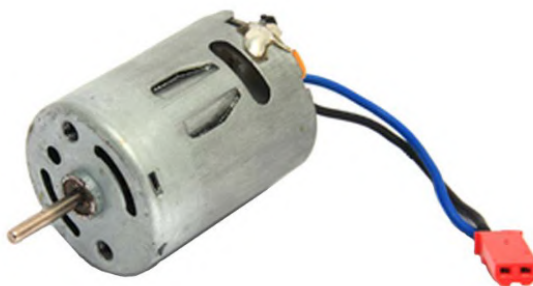
- Pokud je frekvence příliš nízká, motor nepoběží plynule.
- Pokud je frekvence moc velká, spínač se nemusí stíhat otevřít a zavřít v krátkém časovém intervalu. Zároveň zvýší tepelné ztráty elektromagnetů, čímž sníží efektivitu motoru.

Běžnou frekvencí je 50Hz, PWM frekvence bývá uváděna v datových listech.

Frekvence v rozmezí mezi 30Hz a 20kHz patří do rozsahu sluchu lidského ucha, proto mohou způsobovat hluk. Pokud je hluk pro danou aplikaci problém, doporučuje se nastavit frekvenci větší než 20kHz.

Stejnosemnné motory se dělí na dvě kategorie, motory kartáčové (brushed) a bezkartáčové (brushless, BLDC). [28]

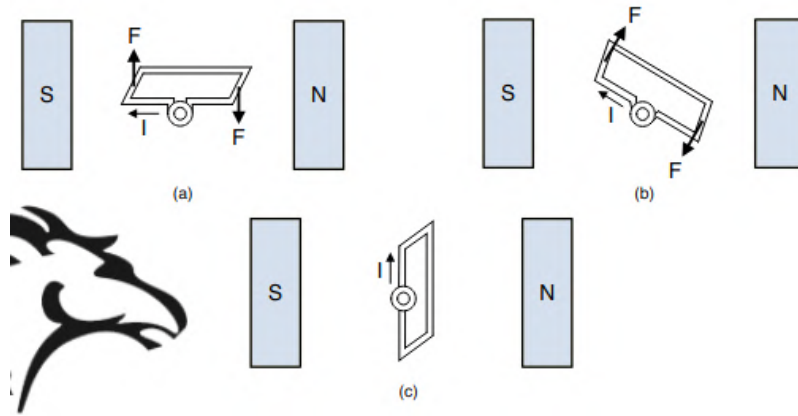
Kartáčové stejnosměrné motory jsou jednoduché konstrukce a jsou jednoduché na ovládání. Obrázek 2.25 ukazuje jak vypadá 12 voltový kartáčový stejnosměrný motor.



Obrázek 2.25: Příklad 12V kartáčového DC motoru, převzato z [28].

Navzdory jejich jednoduchosti se nehodí na některé použití, zejména kvůli mechanické komutaci. Motor se skládá z vodiče, kterým prochází elektrický proud a magnetického pole. Elektrický proud se musí měnit v čase, kdyby zůstal konstantní, tak motor nemůže udělat celou otočku. Obrázek 2.26 ukazuje tento problém, i je proud a F je síla působící na vodič. Síla F závisí na úhlu vodiče, tedy natočení jeho magnetického pole a statického magnetického pole s a N (magnetické pole jde od N k S). Průchodem proudem i vznikne

působící síla F , která začne rotovat s vodičem po směru hodinových ručiček (obrázky a, b). v moment, kdy se vodič dostane do stavu na obrázku c, tak se zastaví, jelikož jsou magnetická pole zarovnaná a výsledná síla F je 0.



Obrázek 2.26: Příklad funkce kartáčového DC motoru, převzato z [28].

Pro řešení tohoto problému byl vynalezen komutátor. Mechanické kontakty připojené na armaturu a vždy po půl otočky otočí směr proudu. Tato změna se nazývá komutace. Mechanické kontakty tvoří mechanický komutátor, často nazývaný kartáč.

Kartáčových motorů jsou tři typy, na základě jak vytváří magnetické pole [28]. Motor generující magnetické pole permanentními magnety se nazývá střídavý motor s permanentním magnetem (PMDC motor). Další dva typy generují magnetické pole pomocí elektromagnetů, tedy cívky okolo železného jádra, nazývány budicí vinutí nebo budicí cívky.

Stejnoseměrné motory s permanentními magnety (PMDC) jsou nejpobulárnějším typem kartáčových motorů. Protože používají permanentní magnety, mají konstantní magnetické pole. To znamená, že K_V , poměr rychlosti na napětí, je konstantní. Obrázek 2.27 ukazuje strukturu kartáčového motoru.

Jejich nevýhodou je ztráta zmagetování permanentních magnetů stářím [28]. Tím motor časem produkuje menší kroutivý moment a rychlost. Odmagnetování se urychluje velkými startovními proudy.

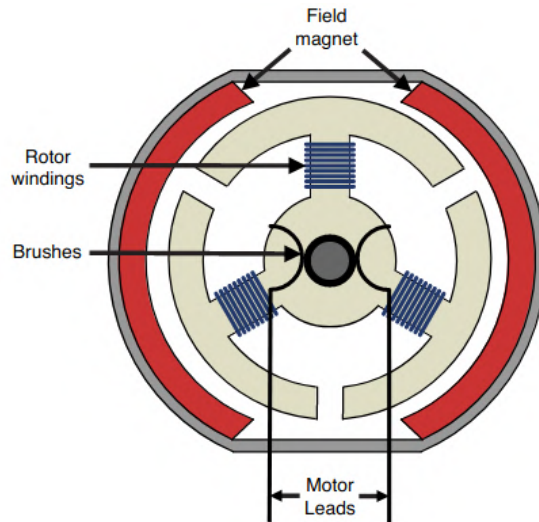
Stejnoseměrné motory se sériovým buzením (SWDC - Series-Wound)

V SWDC motorech je budicí vinutí (stator) propojeno do série s vinutím rotoru (armaturou), to znamená že proud procházející budicí vinutím a armaturou je stejný. Jako je zobrazeno na obrázku 2.28.

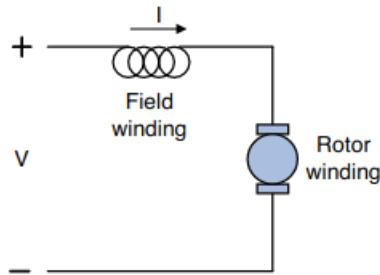
Zvýšením proudu se zvýší kroutivý moment, zároveň zvýší dále magnetické pole, které dále zvýší kroutivý moment [28]. Proto SWDC motory mají vyšší kroutivý moment než PMDC motory. Problém mají v ovládní rychlosti, protože změnou proudu se mění síla magnetického pole, mění se i K_V . Tím je obtížné spolehlivě nastavit rychlost.

Derivační stejnoseměrné motory (SHWDC - Shunt-Wound)

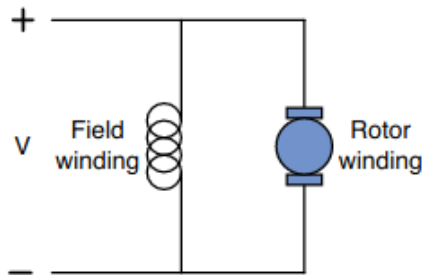
mají budicí vinutí propojené paralelně s armaturou. To znamená, že budicí vinutí a armatura mají stejné napětí. Zapojení je zobrazeno na obrázku 2.29.



Obrázek 2.27: Struktura kartáčového PMDC motoru, převzato z [28].



Obrázek 2.28: Struktura kartáčového motoru se sériovým buzením, převzato z [28].



Obrázek 2.29: Struktura kartáčového motoru se paralelním buzením, převzato z [28].

Takové zapojení neprodukuje tak velký kroutivý moment jako sériové zapojení, ale jeho křivka závislosti kroutivého momentu na rychlost je vodorovná. Takže pro různé zatížení si motor udržuje rychlost. Proto jsou tyto motory využívány v situacích, kdy je potřeba spolehlivá kontrola rychlosti.

Problém kartáčových motorů spočívá v tření kartáče běžně tvořeného uhlíky. Tímto třením se postupně opotřebovává a je nejporuchovější část, kterou je třeba opravovat [28]. Pro jejich cenu, jednoduchost a jednoduché řízení se hojně prodávají. Jejich pořizováním

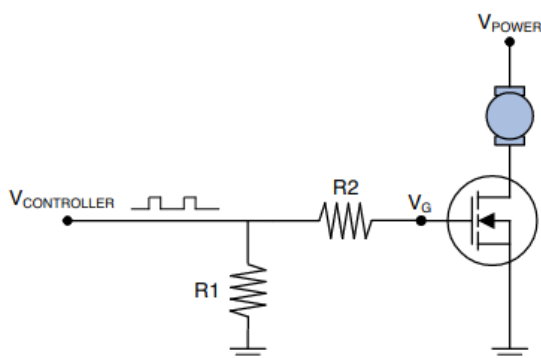
se ušetří na řídicí elektronice a pokud je cílem nízká cena a není důležitá dlouhodobá spolehlivost, tak jsou kartáčové stejnosměrné motory správnou volbou.

Řízení kartáčových stejnosměrných motorů

je jednoduché. Řídit je můžeme dvěma způsoby:

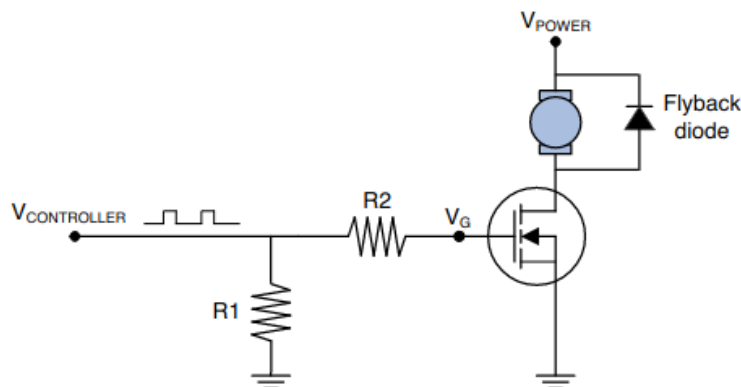
- Jednosměrné řízení - Pokud stačí otáčení pouze jedním směrem, použití tranzistoru.
- Dvousměrné řízení - Pokud je potřeba změna směru otáčení, použití H můstku.

Pro jednosměrné řízení stačí jeden tranzistor. Na obrázku 2.30 máme znázorněno zapojení s MOSFET (tranzistor), ovládaného mikrokontrolérem.



Obrázek 2.30: Jednosměrné řízení motoru, převzato z [28].

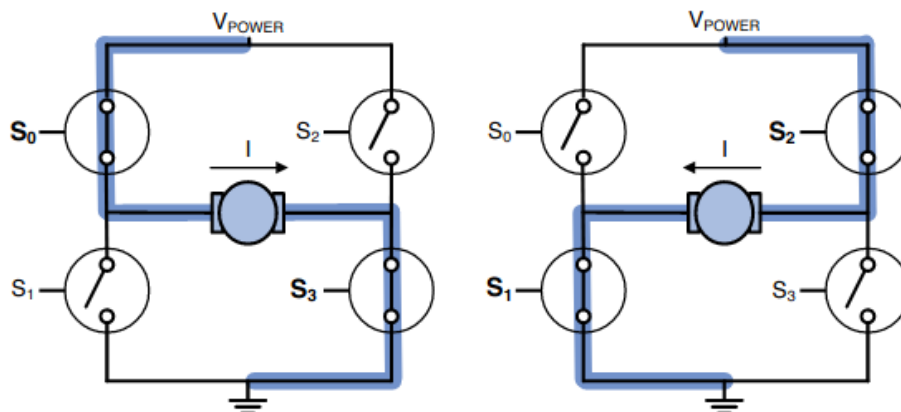
Zapojení má problém s back-EMF, které může vzniknout rotací motoru při vypnutém motoru, tím generaci energie. Pokud na to není obvod připravený, může ho poškodit. Pro ochranu se používá takzvaná flyback dioda, zapojená paralelně s motorem, zobrazeno na obrázku 2.31.



Obrázek 2.31: Lepší jednosměrné řízení motoru s flyback diodou, převzato z [28].

Pokud je obvod napájený z akumulátoru, back-EMF nabije akumulátor. Pokud se ale používá například spínaný zdroj z elektrické sítě, je nutno back-EMF vybit. To lze pomocí vysokovýkonové LED nebo vysokovýkonového rezistoru.

Pro dvojsměrné řízení se používá čtyř tranzistorů zapojených do můstku [28]. s jejich pomocí lze řídit proud procházející motorem dvěma směry, zobrazeno na obrázku 2.32. Existují již vytvořené integrované obvody můstků. Jdou koupit už celé řídicí obvody. Při jejich výběru je nutné myslet na kompatibilitu s daným motorem.



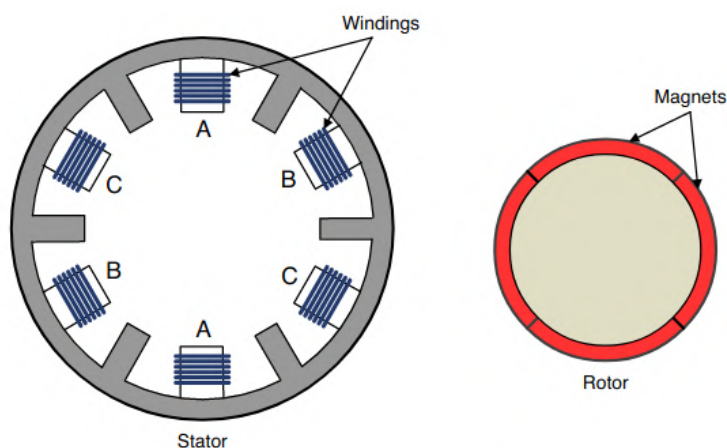
Obrázek 2.32: Řízení motoru obousměrně pomocí H můstku, převzato z [28].

Bezkartáčové stejnosměrné motory (BLDC motory)

Jejich vznik byl umožněn miniaturizací tranzistorů a dalších obvodových prvků pro stvoření komplexních integrovaných obvodů. Pomocí složitějších integrovaných obvodů bylo možné stvořit motor s elektrickou komutací [28]. Motor funguje na časovaných pulzech stejnosměrného proudu.

Struktura BLDC motorů

Jsou komplexnější a dražší než motory kartáčové. Zato jsou spolehlivější a efektivnější, jelikož jejich rotor a stator nemají mechanický kontakt [11]. Obrázek 2.33 ukazuje strukturu bezkartáčového motoru.



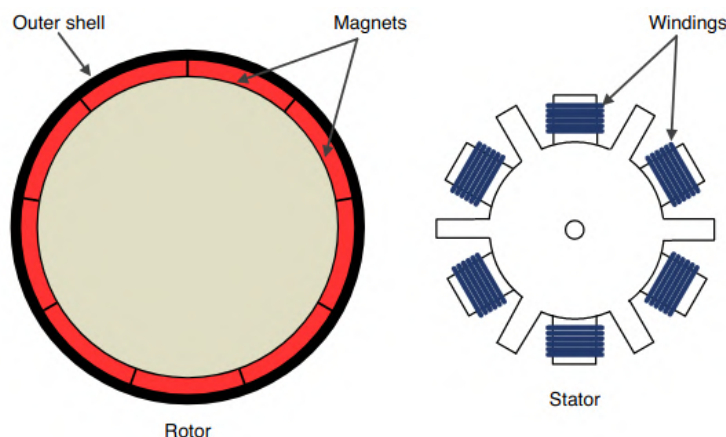
Obrázek 2.33: Struktura BLDC motoru, převzato z [28].

Jak lze na obrázku 2.33 vidět, motor se skládá z několika elektromagnetů, nazývaných vinutí, skládajících stator. Kontrolér posílá pozitivní a negativní proud na vinutí v sekvenci. Na obrázku 2.33 je šest vinutí upevněno na pozicích nazývaných sloty. Vinutí stejného jména jsou propojena. Kontrolér ovládá pouze tři vstupy motoru, proto se tomuto BLDC motoru říká třífázový motor. Většina BLDC motorů má 3 fáze.

Kontrolér dodává proud sekvenčně po nebo proti směru hodinových ručiček, rychlost je s přepínáním synchronizována. Jedná se tedy o synchronní motor. Rozdíl mezi BLDC a AC motory je průběh proudu ve vinutích. u BLDC je skokový a u AC sinusový, to může způsobovat u BLDC motorů zubatost pohybu (cogging). Řešením je bezslotový stator, který vyžaduje více vinutí, je dražší.

Rotor je tvořen několika permanentními magnety. Na obrázku 2.33 jsou to 4 magnety, ale běžně mají více magnetů. Každý magnetický pól se označuje jako pól. Obecně zvyšováním počtu pólů se zvyšuje kroutivý moment. Datové listy většinou specifikují počet pólů BLDC motorů. Sloty a póly mohou být v různých konfiguracích. Pokud je počet slotů násobkem pólů, říkáme motoru integrální, jinak frakční. K redukci cogging je preferován frakční motor.[28] Někdy se slotům říká póly statoru a magnetům magnetové póly. Někdy zapsáno jako XN, YP, kde X je počet slotů a Y je počet magnetů.

BLDC motory mohou být i se statickou hřídelí a rotujícím tělem motoru, takové motory mají velký počet magnetů, jak je vidět na obrázku 2.34, tím vysoký kroutící moment a nižší rychlost.

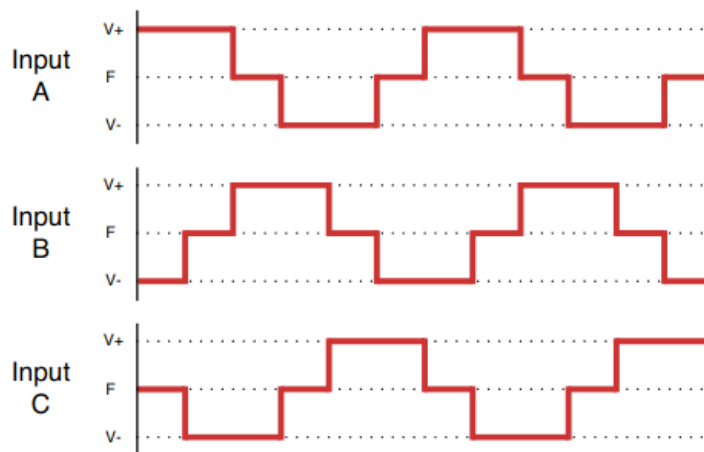


Obrázek 2.34: Struktura BLDC motoru se statickou hřídelí a rotujícím tělem, převzato z [28].

Řízení BLDC motorů

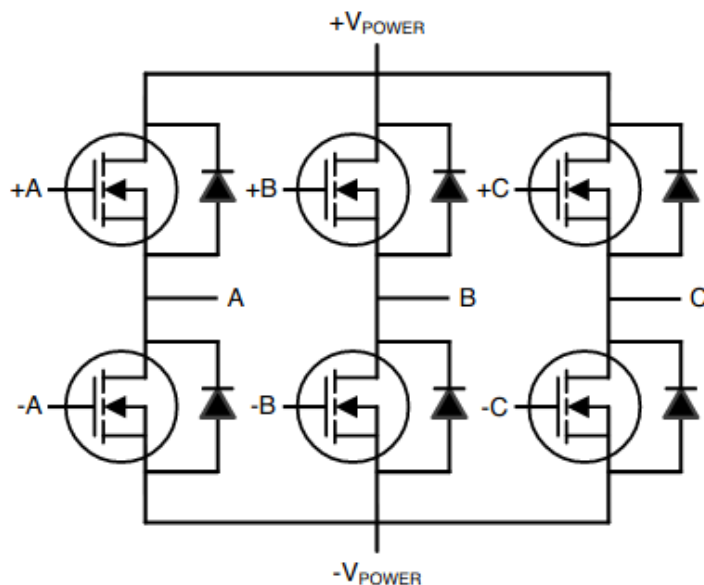
je řešeno časovanými pulzy, počet vstupů závisí na počtu fází motoru. Většina BLDC motor má 3 fáze. Pro řízení je nutné znát pozici rotoru, tu je možné získat pomocí senzorů zabudovaných do motoru nebo pomocí back-EMF. Rychlost je závislá na frekvenci pulzů a na elektrickém napětí.

Třífázové BLDC motory mají 3 vstupy (A,B,C). v jakémkoliv okamžiku je jeden nastaven na kladné napětí (V+), jeden na záporné napětí (V-) a jeden je nepřipojen (floating). Ukázka signálů je na obrázku 2.35.



Obrázek 2.35: Průběh řídicích signálů BLDC motoru, převzato z [28].

Třífázové BLDC motory mají 6 možných fázových stavů, každý z nich odpovídá 60° otočky. s vyšším proudem roste kroutivý moment. Otočením pořadí pulzů lze měnit směr otáčení, proto nejsou potřeba H můstky. Pro ovládání BLDC motorů se používá obvodů zvaných invertor, které se mimo jiné používají ke změně stejnosměrného napětí na střídavé. Zapojení třífázového BLDC motoru pomocí invertoru založeném na tranzistorech typu MOSFET je vidět na obrázku 2.36.



Obrázek 2.36: Spínací obvod pro generování pulzů třech fází, převzato z [28].

Pro zjištění polohy motoru a tedy zjištění, které vinutí jak napájet, se používají senzory hallova efektu, které měří magnetické pole. Pomocí takových senzorů může mikrokontrolér vyhodnotit orientaci magnetického pole a tím polohu natočení motoru.

Dalším způsobem je měření back-EMF, k tomu nepoužívá senzory, ale měří napětí nenapájené (floating) fáze motoru. Změřením fází mikrokontrolér zjistí orientaci magnetického

pole. Back-EMF je spojeno s rychlostí rotace motoru, proto pro měření musí motor již rotovat. Nejdříve začne naslepo napájet jednotlivá vinutí, pak podle měření se bude synchronizovat s rotací motoru.[28] Pro výpočet orientace se používá zero-crossing detekce (ZCD) nebo rozšířených kalmanových filtrů (EKF).

Pro ovládání rychlosti se používají již vytvořené kontroléry, nazývané electronic speed control (ESC). ESC řídí motor podle PWM signálu.

2.4.5 Krokové motory

Hlavní účel krokového motoru je přesné otočení o určitý úhel a následné zastavení (krok). Rychlost a kroutivý moment [5] jsou druhotné vlastnosti krokového motoru [28]. Krokové motory běžně mají kroky o 30° , 15° , $7,5^\circ$, 5° , $2,5^\circ$ a $1,8^\circ$.

Kvůli jejich jednoduchosti a přesnosti jsou krokové motory běžně používány v elektrických zařízeních. Používají se například u analogových hodin, výrobních robotů, v tiskárnách (2D a 3D). Jejich velkou výhodou je, že kontrolér nemusí měřit polohu krokového motoru, aby zjistil jeho orientaci, proto jsou často používány v open-loop systémech [5]. Pokud má krokový motor krok $2,5^\circ$, každý kontrolní signál otočí motor o $2,5^\circ$.

Pro mnoho účelů chceme krokový motor s co nejmenším krokem, velké úhlové rozlišení. Další důležitou vlastností je takzvaný holding torque, neboli kroutivý moment držení pozice motoru.

Krokové motory mohou být rozděleny do tří kategorií:

- Permanentní magnet (PM) - Vysoký kroutivý moment, nízké úhlové rozlišení.
- Variabilní reluktance (VR) - Excelentní úhlové rozlišení, nízký kroutivý moment.
- Hybridní (HY) - Kombinuje strukturu PM a VR krokových motorů, poskytuje dobrý kroutivý moment a dobré úhlové rozlišení.

Krokové motory s permanentním magnetem (PM krokový motor)

Malé a spolehlivé, používají se například v diskových mechanikách a tiskárnách. PM krokový motor je na obrázku 2.37.

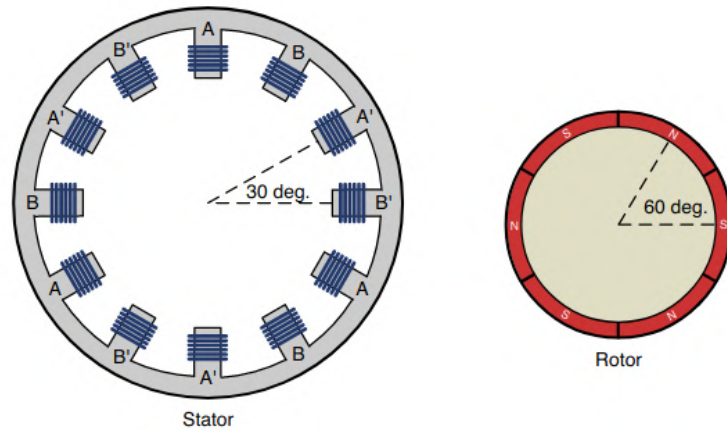


Obrázek 2.37: Ukázka PM krokového motoru, převzato z [28].

PM krokový motor je podobný BLDC motoru, rozdíl spočívá v napájení vinutí. Zatím co BLDC napájí vinutí, aby získal spojitou rotaci. PM krokový motor skokově rotuje, tedy po krocích. Na obrázku 2.38 je zobrazena struktura PM krokového motoru.

PM krokové motory a BLDC motory mají 5 spojitostí:

- Nepoužívají kartáč nebo mechanický komutátor.
- Rotor je uvnitř (na hřídeli), povrch rotoru tvoří permanentní magnety.



Obrázek 2.38: Vnitřní struktura PM krokového motoru, převzato z [28].

- Stator je vnějšek (tělo motoru), tvořený elektromagnety (vinutími) ve slotech.
- Kontrolér napájí vinutí pulzu stejnosměrného proudu.
- Několik vinutí je spojeno dohromady. Každá skupina spojených vinutí tvoří fázi.

Hlavním rozdílem je velký počet vinutí PM krokového motoru, ten je důležitý pro větší úhlové rozlišení [28].

Operace PM krokových motorů

Úhel kroku je určen podle počtu vinutí a počtu magnetů rotoru. Obrázek 2.38 ukazuje PM krokový motor s 12 vinutími a 6 magnety. PM krokové motory jsou většinou dvoufázové motory, na obrázku značeny a a B. Vinutí popsané jako A' a B' dostávají stejný proud jako a a B, ale v opačném směru. Pokud je vinutí a severním pólem, vinutí A' bude jižním pólem.

Každé vinutí může být ve stavu pozitivního proudu, negativního proudu nebo nenapájené. Pro tuto ukázkou bude pozitivní proud značit severní pól (N) a negativní proud jižní pól (S).

Obrázek 2.39 znázorňuje jeden krok o 30° . Vinutí s N a S značí výsledné magnetické pole, ostatní vinutí jsou nenapájená. Permanentní magnety rotoru jsou přitahovány opačnými póly statoru.

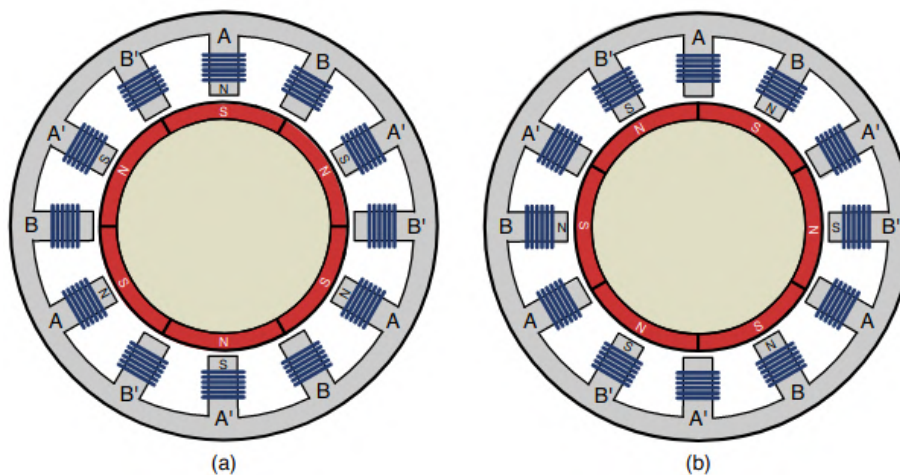
Taková struktura PM krokových motorů (12 vinutí a 6 magnetů) je běžná [28]. Dělají kroky 30° , některé dělají i 15° nebo $7,5^\circ$ kroky.

Krokové motory založené na variabilní reluktanci (VR krokové motory)

Stejně jako odpor určuje elektrický proud, tak reluktance určuje magnetický tok [28]. u VR krokových motorů se rotor otáčí o určitý úhel, aby minimalizoval reluktanci mezi protějšími vinutími statoru.

Jejich hlavní výhodou je excelentní úhlové rozlišení a jejich nevýhodou je nízký kroutivý moment.

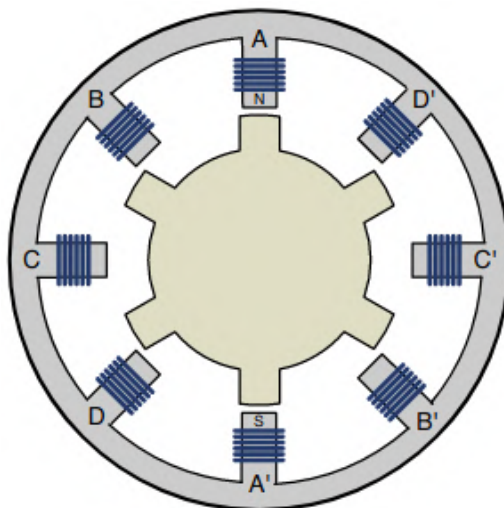
Strukturně jsou podobné PM krokovým motorům. Oboje mají vinutí na statoru, kde protější vinutí jsou spojena a mají stejné napájení. Jsou mezi nimi však dva hlavní rozdíly:



Obrázek 2.39: 30° rotace PM krokového motoru, převzato z [28].

- Rotor - Oproti PM krokovým motorům, VR krokové motory nemají rotor tvořený magnety. Místo toho mají železný disk se zuby [11].
- Fáze - PM krokové motory mají 2 fáze. VR krokové motory mají zvlášť každou dvojici protějších vinutí. Pokud má VR krokový motor N vinutí, má $N/2$ fází a dostává tedy $N/2$ řídicích signálů.

Obrázek 2.40 ukazuje strukturu VR krokového motoru, v tomto případě má stator 8 vinutí a rotor má 6 zubů.



Obrázek 2.40: Vnitřní struktura VR krokového motoru, převzato z [28].

Rotor nemá magnety, ale protože je tvořen železem, je přitahován k napájeným vinutím [28]. Na obrázku 2.40 jsou vinutí a a A' napájena. Zuby rotoru se zarovnaly s těmito vinutími, aby umožnily cestu magnetickému toku mezi a a A'.

Operace VR krokových motorů

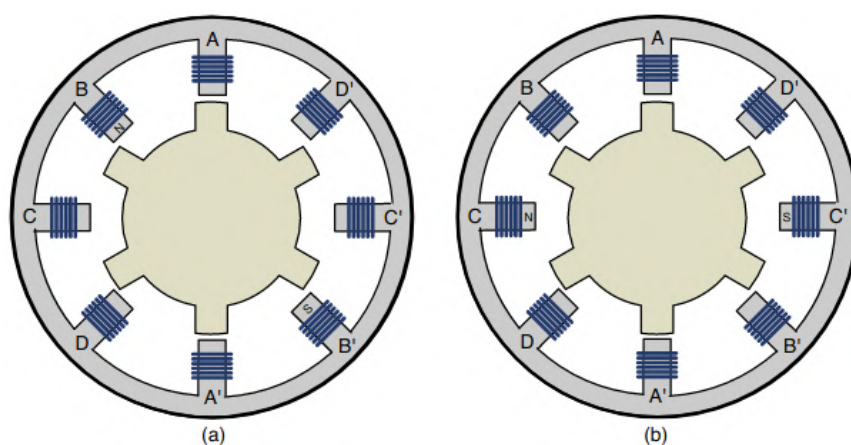
Jak je vidět na obrázku 2.40, pouze jeden pár zubů je zarovnan s vinutími. Když kontrolér začne napájet jiné vinutí, rotor se natočí, aby byly zarovnané. Protože zuby nejsou zmagnetované, tak nezáleží jestli vinutí je severní nebo jižní pól.

Obrázek 2.41 znázorňuje rotaci VR krokového motoru o 15° proti směru hodinových ručiček.

Pokud je počet vinutí statoru (N_W) a počet zubů rotoru (N_t), tak úhel kroku je vypočítán jako:

$$\text{Úhel kroku} = 360 \times \frac{N_W - N_t}{N_W N_t}$$

Tedy z příkladu $N_W = 8$ a $N_t = 6$. Takže výsledný úhel kroku je $360(2/48) = 15^\circ$. Úhlové rozlišení může být zlepšeno navýšením počtu vinutí a zubů. Výsledně může mít mnohem lepší úhlové rozlišení než PM krokový motor.



Obrázek 2.41: 15° rotace VR krokového motoru, převzato z [28].

Problém VR motorů je v jejich nízkém kroutivém momentu a tedy nezvládají větší zátěž [28]. Proto nejsou moc používané. Pro vyřešení tohoto nedostatku byl stvořen hybridní krokový motor.

Hybridní krokový motor (HY krokové motory)

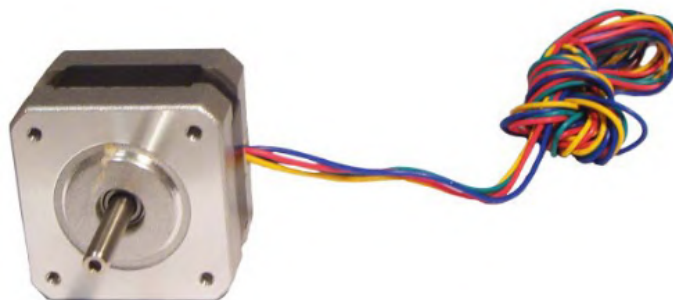
Poskytují to nejlepší z obou světů [28]. Jako PM krokové motory má rotor s magnety, poskytující kroutivý moment. Jako VR krokové motory, rotor má zuby pro zlepšení úhlového rozlišení. Na obrázku 2.42 je ukázka hybridního krokového motoru.

Hybridní motory mají dvě nevýhody. HY krokové motory jsou dražší než PM krokové motory a také jsou větší a těžší než PM krokové motory [28]. To je důsledkem jejich konstrukce.

Struktura HY krokových motorů

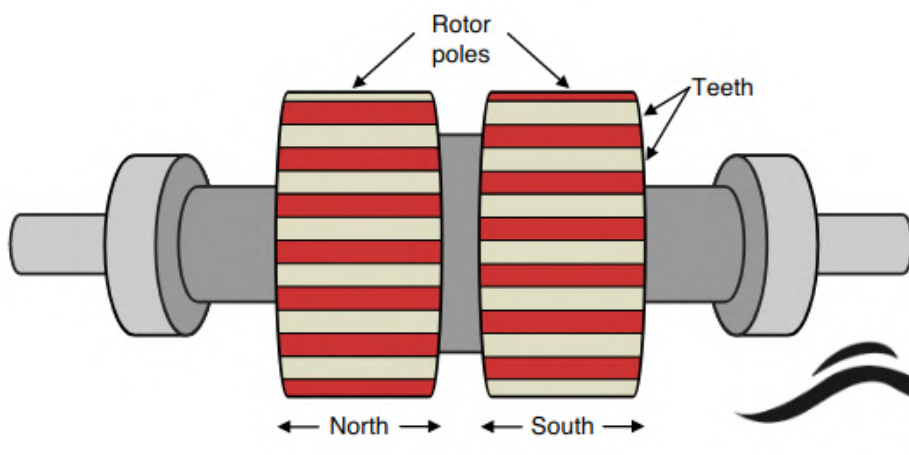
Hybridní krokové motory mají odlišnou strukturu od PM a VR krokových motorů, jejich princip však zůstává stejný.

Hybridní krokové motory bývají delší, jak jde vidět na obrázku 2.42. Důvod je, že rotor hybridního krokového motoru se skládá z minimálně dvou rotujících mechanismů,



Obrázek 2.42: Hybridní krokový motor, převzato z [28].

připojených k sobě. Tyto mechanismy se nazývají póly rotoru, obrázek 2.43 ukazuje, jak vypadají.



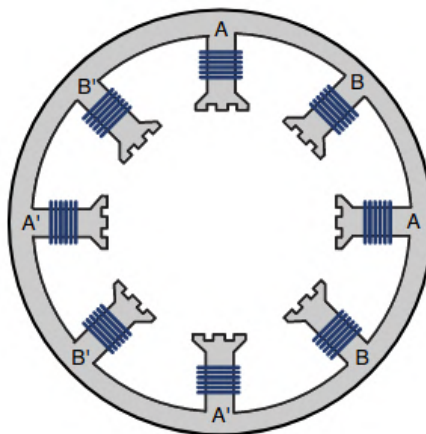
Obrázek 2.43: Struktura hybridního krokového motoru, převzato z [28].

Póly rotoru jsou zmagnetizovány tak, aby jeden byl severním pólem a druhý jižním pólem. Každý pól má vlastní zuby, póly jsou spojené tak, že zuby jednoho jsou mezi zuby druhého. Úhel mezi zuby pólů udává úhel kroku motoru. Čím více má rotor zubů, tím větší má úhlové rozlišení.

Rotor na obrázku 2.43 má pouze jeden pár pólů. Existují hybridní krokové motory s více páry pólů (2, 3, a více). Přidáním více párů pólů se zvýší kroutivý moment, ale za to se zvětší velikost a váha.

Stator PM a VR krokových motorů má moc velké vinutí, aby přitahoval nebo odpuzoval pouze jeden zub rotoru hybridního krokového motoru. Proto má stator hybridního krokového motoru zuby, které jsou přibližně stejně velké jako zuby rotoru. To je ukázáno na obrázku 2.44.

Na obrázku má každé vinutí tři zuby, v reálných motorech mají ovšem zubů mnohem více [5]. Pokud je vinutí napájeno, aby se stalo severním pólem, jeho zuby budou přitahovat zuby jižního pólu rotoru [28]. Pokud se bude vinutí chovat jako jižní pól, jeho zuby budou přitahovat zuby severního pólu rotoru.



Obrázek 2.44: Struktura statoru hybridního krokového motoru, převzato z [28].

Operace hybridního krokového motoru

Jako VR krokový motor, tak HY krokový motor může mít několik fází, jednu pro každý pár vinutí. Většina hybridních krokových motorů je zapojena jako PM krokové motory. Takže do dvou fází, nazývaných A/A' a B/B'. Tyto fáze jsou zobrazeny na obrázku 2.44.

Každá fáze dostává pozitivní, negativní nebo nulový proud. Když je jedna fáze napájena, její vinutí přitahuje zuby jednoho pólu rotoru. Když je další fáze napájena, její vinutí přitahuje zuby jiného pólu rotoru. Hybridní krokové motory mají běžně 50-60 zubů na pólu rotoru, tím mají vysoké úhlové rozlišení [28]. Běžně mají hybridní krokové motory úhel kroku nízký, jako $1,8^\circ$ a $0,9^\circ$.

Řízení krokových motorů

Protože se VR krokové motory moc nepoužívají, v této sekci bude popsáno pouze ovládání PM a HY krokových motorů, které mají skoro vždy 2 fáze. Některé PM a HY krokové motory jsou bipolární a mají čtyři vodiče. Ostatní jsou unipolární a mají pět nebo šest vodičů [28].

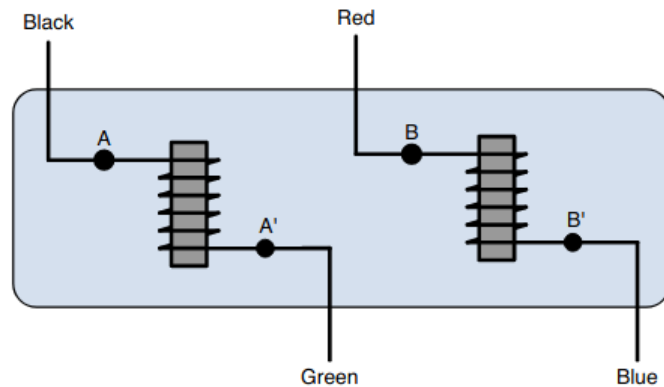
Pro řízení lze použít mikrokontroléry, ty mají hlavně nízkou cenu, nebo se často používá hardwarová implementace. Pro hardwarovou implementaci se buď použije FPGA [13, 51] nebo se používají ASIC kontroléry [52, 25].

Pojmy bipolární a unipolární znamenají jak jsou vodiče zapojeny k vinutím motoru [5]. Před designem řídicího obvodu je nutné vědět zda je motor unipolární nebo bipolární. Další částí této sekce je metoda mikrokrokování (microstepping), který dále zvyšuje úhlové rozlišení.

Řízení bipolárních krokových motorů

Dvojfázový bipolární krokový motor má čtyři vodiče. Obrázek 2.45 ukazuje jejich zapojení uvnitř motoru. Můžou být zapojeny paralelně nebo sériově [5].

Obrázek popisuje Elektromagnety a jim příslušné fáze A/A' a B/B'. v kapitole o DC motorech bylo vysvětleno, že se póly elektromagnetu zmagnetují podle směru stejnosměrného proudu jimi procházejícího. Pokud proud teče z černého do zeleného vodiče, a bude

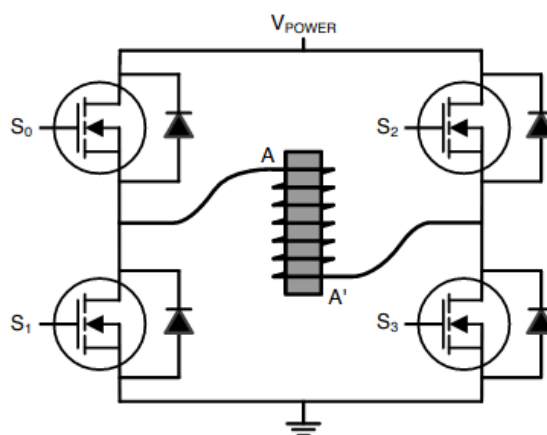


Obrázek 2.45: Zapojení bipolárního krokového motoru, převzato z [28].

severní pól a A' bude jižní pól. Pokud proud teče naopak, ze zeleného do černého vodiče, tak a bude jižní pól a A' bude severní pól.

Obrázek 2.45 popisuje barvu vodičů vstupujících do motoru. Barvy vodičů nejsou dány žádným standardem, ale mnoho bipolárních krokových motorů dodržuje tuto barevnou konvenci [28]. Pokud má motor jiné barvy vodičů, je vhodné nejdříve zkontrolovat datový list a popřípadě změřit odpor mezi vodiči. Vodiče stejné fáze budou mít mezi sebou malý odpor a vodiče odlišných fází velký odpor.

Pro řízení bipolárních krokových motorů je nutné mít schopnost otočení směru proudu. Běžná metoda pro řešení otáčení směru proudu je H můstek, který je již popsán u řízení kartáčových stejnosměrných motorů. H můstek se skládá ze 4 spínačů, které při správném nastavení dokáží pouštět elektrický proud oběma směry.

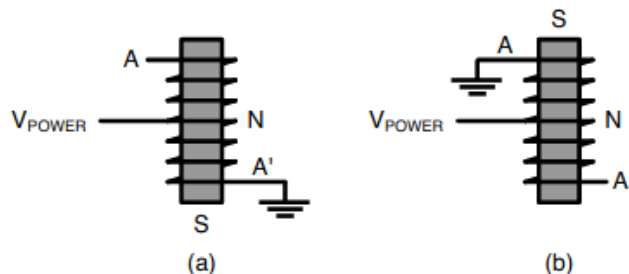


Obrázek 2.46: Zapojení bipolárního krokového motoru do H můstku, převzato z [28].

Obrázek 2.46 ukazuje jak může být jedna fáze bipolárního krokového motoru zapojena do H můstku.

Řízení unipolárního krokového motoru

Zapojení unipolárního krokového motoru je složitější než bipolárního. Cíl zůstává stejný, tedy napájení A, A', B a B' a nastavení jejich pólů. Možné zapojení unipolárního krokového motoru je zobrazeno na obrázku 2.47.



Obrázek 2.47: Zapojení unipolárního krokového motoru, převzato z [28].

Na obou obrázcích, V_{POWER} je napojený na střed vinutí elektromagnetu, takový druh napojení se nazývá center tap. Na obrázku a je spodní část vinutí připojena na zem. Proud teče ze středu do země. Tím napájí elektromagnet a dělá ze spodního vinutí jižní pól. Přitom je severní pól vytvořen na středu.

Vrchní část vinutí neteče žádný proud, protože a není nikam připojeno. Nicméně celé železné jádro je zmagnetováno spodní částí vinutí. To znamená, že vrchní část vinutí se také chová jako severní pól. Proto je na obrázku a, a je severní pól a A' je jižní pól.

Obrázek b znázorňuje opačnou situaci. Vrchní část je připojena na zem, tudíž proud teče od středu nahoru. Tím zmagnetuje a na jižní pól a střed vinutí jako severní pól. Ale protože je celé železné jádro zmagnetováno, tak i spodní část vinutí se chová jako severní pól.

Proto je potřeba při zapojení unipolárního krokového motoru udělat tři věci. Připojit napájení V_{POWER} na střed obou vinutí. Jeden vodič každé fáze uzemnit. Ostatní nechat nepřipojené.

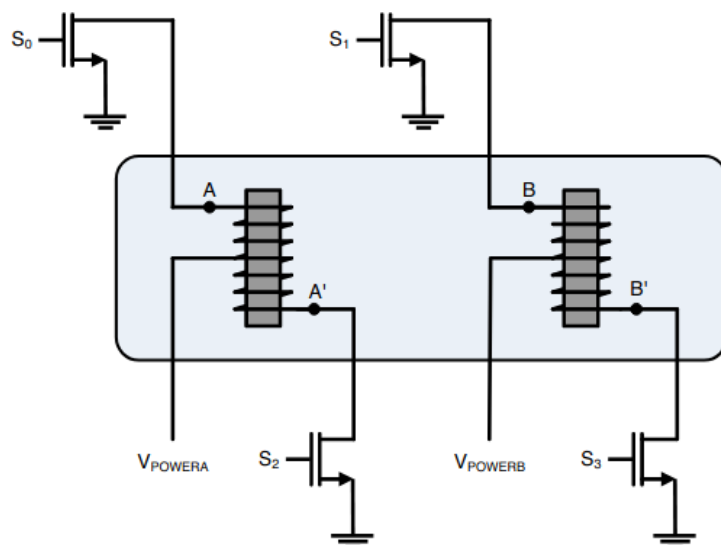
Obrázek 2.48 ukazuje šest vodičů vstupujících do unipolárního krokového motoru. Dva vedou napájení (V_{POWER_A} a V_{POWER_B}) a čtyři jsou připojené na A, A', B a B'. Každý ze čtyř vodičů je připojen na MOSFET. Pokud se MOSFET otevře, připojí vodič na zem, jinak bude vodič nepřipojený.

Pokud je vodič připojen na zem, jeho část vinutí se stává jižním pólem a druhá část se stává severním pólem. Pro příklad, pokud je MOSFET S1 seplý, výsledný proud zmagnetuje B na jižní pól a B' se stane severním pólem.

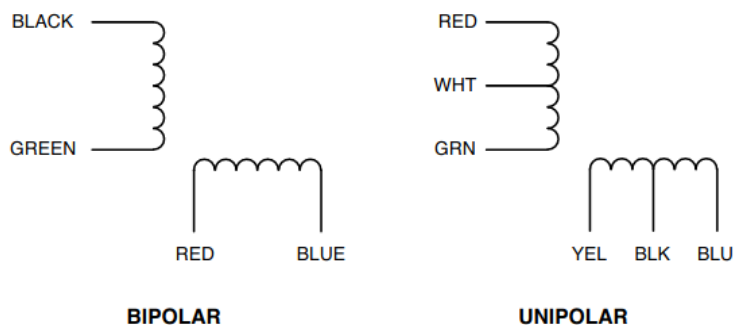
Mnoho unipolárních krokových motorů má pouze pět vodičů. To je kvůli spojení napájecích vodičů (V_{POWER_A} a V_{POWER_B}) do jednoho vodiče.

Unipolární krokové motory jsou tedy jednodušší na ovládání než bipolární krokové motory, protože není potřeba ovládat tranzistory dvou H můstků [28]. Nicméně u unipolárních krokových motorů je napájena vždy jen jedna polovina elektromagnetu. Bipolární krokové motory jsou tedy efektivnější [5]. Proto je doporučeno používat bipolární krokové motory vždy, kdy je to možné.

Na obrázku 2.49 je ukázáno reálné značení vinutí bipolárních a unipolárních krokových motorů, používané v datových listech.



Obrázek 2.48: Řízení unipolárního krokového motoru, převzato z [28].



Obrázek 2.49: Diagram zapojení krokového motoru, převzato z [28].

Módy řízení krokových motorů

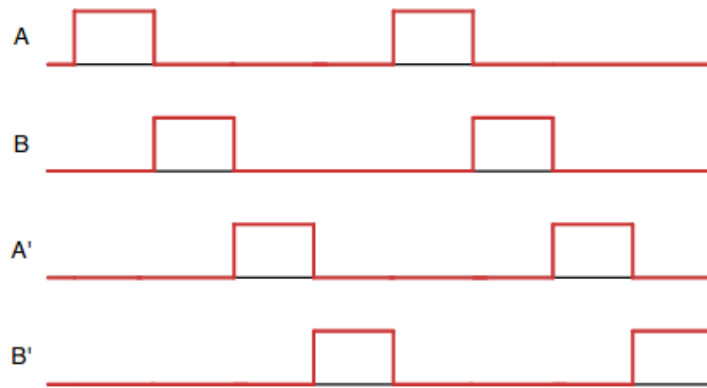
Jsou různé možnosti napájení jednotlivých fází [28]:

- Celý krok (jedna fáze napájena) - Každý kontrolní signál napájí jedno vinutí.
- Celý krok (dvě fáze napájeny) - Každý kontrolní signál napájí dvě vinutí.
- Půlkrok - Každý kontrolní signál střídá mezi napájení jednoho nebo dvou vinutí.
- Mikrokrok - Kontrolér posílá sinusové signály na vinutí krokového motoru.

Volba mezi těmito módy je kompromis mezi kroutivým momentem, úhlovým rozlišením a příkonem.

Mód celého kroku

Mód celého kroku, při napájení jedné fáze je nejjednodušší možností. Tato metoda byla používána při představování krokových motorů. Obrázek 2.50 ukazuje, jak vypadá sekvence řídicích signálů.



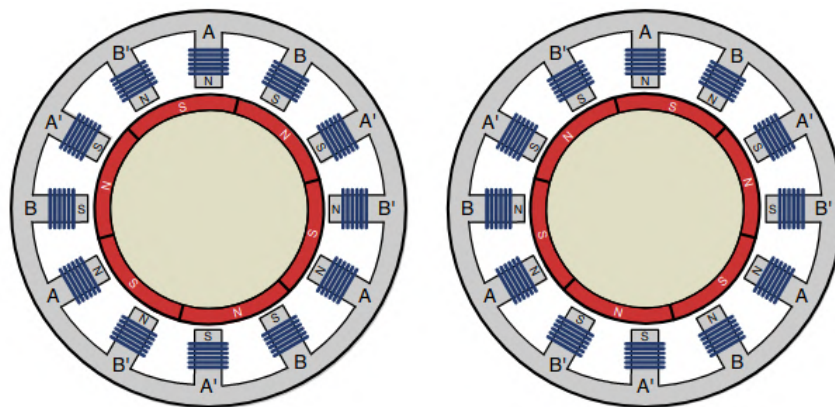
Obrázek 2.50: Sekvence signálů v módu celého kroku jedné fáze, převzato z [28].

S každým kontrolním signálem se rotor otočí, aby se zarovnal s napájeným vinutím. Rotor se otočí o úhel daný krokovým motorem.

Mód celého kroku, s napájením dvou fází, kdy kontrolér napájí dvě vinutí zároveň [28]. Tím otočí rotor o úhel daný motorem, ale rotor se zarovná mezi dvě napájená vinutí. Obrázek 2.51 ukazuje jeden krok krokového motoru v takovém módu řízení.

Obrázek 2.52 ukazuje jak vypadá sekvence signálů v takovém módu řízení.

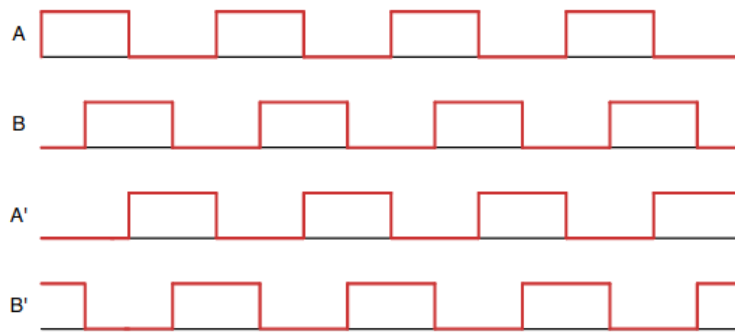
Hlavní výhodou tohoto módu je zvýšení kroutivého momentu o přibližně 30–40%. Nevýhodou je však dvojnásobná spotřeba, napájecí zdroj musí dodat dvojnásobek proudu.



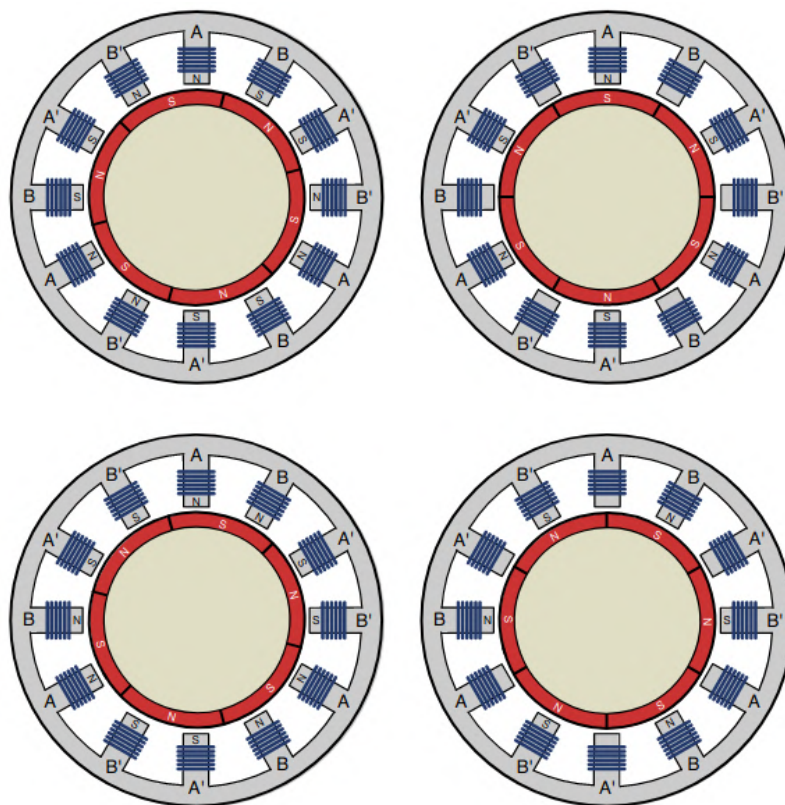
Obrázek 2.51: Krok motoru v módu celého kroku dvou fází, převzato z [28].

Mód půlkrokování

Je kombinací obou předchozích módů. Přesněji, kontrolér střídá mezi napájením jednoho a dvou vinutí. Obrázek 2.53 ukazuje tři rotace krokového motoru v módu půlkrokování. Na obrázku 2.54 je ukázána sekvence signálů použitá při půlkrokování.



Obrázek 2.52: Sekvence signálů v módu celého kroku dvou fází, převzato z [28].

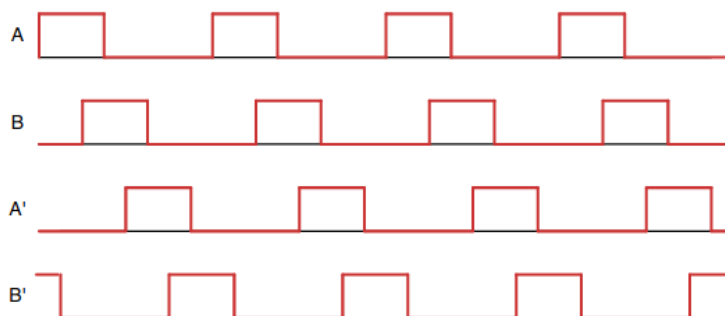


Obrázek 2.53: Krok motoru v módu půlkrokování, převzato z [28].

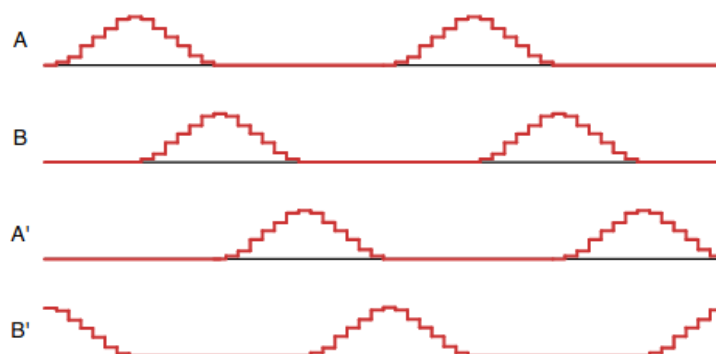
Mód mikrokrokování

Mód mikrokroků slouží k co nejplynulejšímu otáčení krokového motoru [5]. To vyžaduje rozdělení napájecího pulzu do potenciálně stovek kontrolních signálů. Běžně jsou rozděleny na 8, 64 nebo 256. Pokud je napájecí puls rozdělen do 256 signálů, tak $1,8^\circ$ krokový motor se bude otáčet o $1,8^\circ/256 = 0,007^\circ$ za kontrolní signál.

V tomto módu kontrolér posílá proud v sinusovém tvaru. Následující vinutí dostávají zpožděnou verzi tohoto sinusového signálu [28]. Obrázek 2.55 ukazuje, jak takové signály mohou vypadat.



Obrázek 2.54: Sekvence signálů v módu půlkrokování, převzato z [28].



Obrázek 2.55: Sekvence signálů v módu mikrokrokování, převzato z [28].

Použitím tohoto módu klesne kroutivý moment o přibližně 30% a zároveň může být problém s rychlostí.[28] Jak šířka kontrolního signálu klesá, schopnost reakce motoru klesá. Takže pokud kontrolér posílá rychlé pulzy krokovému motoru v módu mikrokroků, motor se nemusí spolehlivě otáčet.

Pokud je potřeba přesného, ale plynulého pohybu, lepší variantou jsou servo motory [28].

Kapitola 3

Navrhnuté řešení

Cílem je navrhnout zařízení, které umožňuje kontinuálně rotovat hlavou osazenou senzory uvnitř objektu a posílat data ze senzorů na stacionární část pro zpracování. Zařízení má snímat obraz vnitřní plochy objektu, měřit hloubkovou mapu pomocí senzoru vzdálenosti a k těmto datům změřit polohu a natočení hlavy. Omezením návrhu je snaha vytvoření zařízení s malým průměrem, které se tak vejde do více (i menších) dutin.

Na obrázku 3.1 je schéma navrhnutého systému, který je rozdělen na dvě části, rozdělené zelenou čarou. Horní část tvoří stacionární hlavu a spodní část rotační hlavu.

Červeně je uvedeno napájecí vedení, jehož zdrojem je hlavní konektor, který poskytuje 24V. RaspberryPi zajišťuje projojení s externím počítačem pomocí ethernetu. Napájecí soustava má několik napěťových domén, proto součástí napájecí soustavy jsou DC/DC převodníky. DC/DC převodníky budou tvořeny LDO, pro převod na 3.3V, které budou použity v nízko energeticky náročných částech obvodu. Pro efektivnější převod na více energeticky náročných částech obvodu použijí spínaných převodníků, převod na 5V, které jsou efektivnější, ale mají větší plochu a větší komplexitu. Napájení rotační hlavy bude zajištěno pomocí cívek. Pro přenos energie je potřeba střídavý proud procházející cívkou. Střídavý proud bude zajišťovat tranzistorový můstek řízený hodinovým signálem mikrokontroleru, určujícím frekvenci střídavého proudu cívek. Na rotační straně je střídavé napětí cívkou usměrněno můstkem diod a vyhlazeno kondenzátorem.

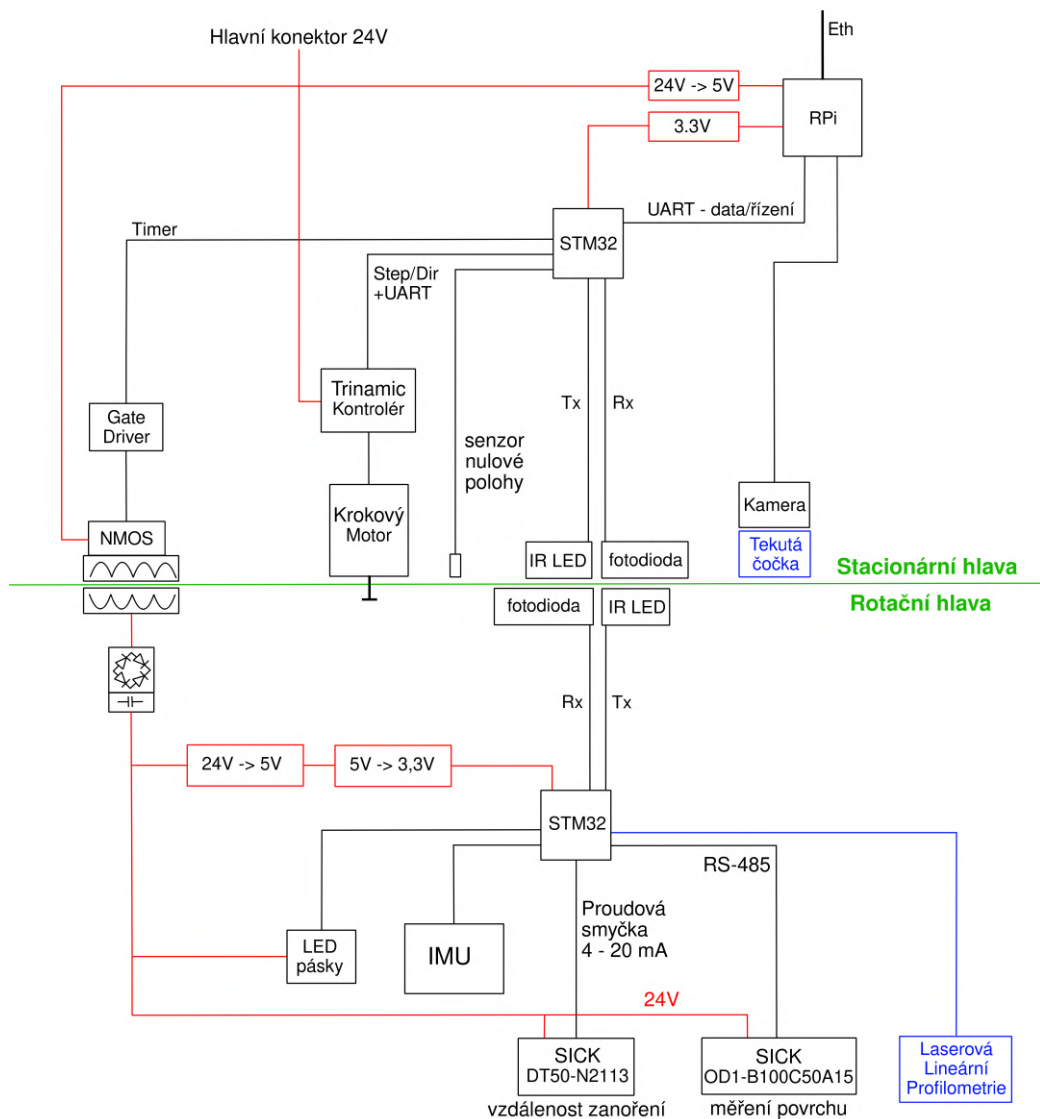
Modře jsou uvedena možná rozšíření systému. Možná rozšíření jsou přidání tekuté čočky ke kameře (zlepšení zaostřování kamery) a použití senzoru laserové lineární profilometrie ke snímání hloukových dat.

Černě jsou vyznačeny hlavní komponenty systému a popřípadě jejich propoje. Kde centrální úlohu zajišťují mikrokontroléry STM32, které řídí komunikaci, sběr dat a jejich zpracování. Mikrokontrolér řídí rotaci krokového motoru pomocí řadiče od firmy Trinamic, ovládaným pomocí rozhraní Step/Dir nebo UART. Pro převod energie mezi částmi zařízení jsou použity cívky. Na statické straně pomocí hodinového signálu mikroprocesoru je vytvořen AC, který je nutný pro bezdrátový přenos. Na rotační straně je přijímaný AC usměrněno zpět na DC. Pro bezdrátový přenos dat budou na obou stranách zařízení zrcadleně IR LED a IR fotodiody, jejichž rozhraním bude UART mikrokontrolérů v režimu IrDA [19]. Pro zjištění nulové polohy je na statické části zařízení reflexní senzor.

Rotační část bude obsahovat LED pásy pro osvětlení snímaného povrchu, jejich intenzita bude řízena mikrokontrolérem. IMU bude sloužit k získání polohy natočení zařízení, tím získání polohy snímaného bodu. IMU bude propojeno s mikrokontrolérem pomocí SPI a dvou pinů přerušeni. Pro snímání zanoření a body povrchu budou snímány laserovými měřáky vzdálenosti od firmy SICK. Dopředný laserový snímač bude komunikovat s mik-

rokontrolérem pomocí proudové smyčky, kde proud je převeden na napětí, které měří mikrokontrolér pomocí ADC. Boční laserový snímač komunikuje pomocí RS485 [12], je tedy potřeba převodník RS485 na UART, kterým komunikuje mikrokontrolér.

RPi značí RaspberryPi, které bude fungovat jako řídicí systém, který bude zajišťovat cíle a komunikaci mezi externím počítačem a mikrokontrolérem. RaspberryPi bude snímat povrch pomocí kamery.



Obrázek 3.1: Schéma navrhnutého systému.

Měření vzdálenosti

Vzdálenost bude měřena jako hloubka zanoření a hloubková mapa povrchu. K měření jsem použil laserové senzory od firmy SICK. Laserový snímač na střední vzdálenosti DT50-N2113 a snímač pro přesné měření na principu triangulace OD1-B100C50A15.

Dopředný senzor

Senzor pro měření vzdálenosti zanoření je SICK DT50-N2113 [30], jeho měření je založeno na době letu laseru. Senzor používá červený viditelný laser. Senzor je schopen měřit od 200 mm až do 20 m, maximální vzdálenost je daná odrazivostí měřeného povrchu. Pro komunikaci s mikrokontrolérem používá proudovou smyčku ve standardním rozsahu 4 mA až 20 mA. Proud je potřeba převést na napětí, které je měřeno pomocí ADC mikrokontroléru. Je schopný být napájen stejnosměrným napětím v rozmezí 10 V až 30 V a jeho příkon je do 2,1 W. Senzor váží 200 g. Podle nastaveného průměrování má odezvu od 15 ms po 80 ms. Rozlišení senzoru je 1 mm a přesnost je ± 7 mm. Senzor je vidět na obrázku 3.2.



Obrázek 3.2: Laserový snímač vzdálenosti zanoření. [30]

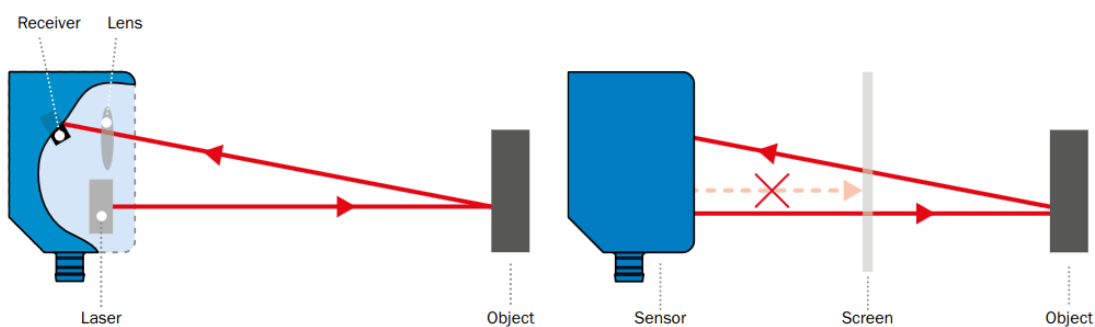
Boční senzor

Senzor pro měření hloubky povrchu je SICK OD1-B100C50A15 [31], který je založen na laserové triangulaci s použitím červeného viditelného laseru. Senzor je schopný měřit ve vzdálenosti od 50 mm po 150 mm s přesností 20 mikrometrů, linearitou $\pm 100 \mu\text{m}$ a měřicí frekvencí až 2 kHz. Senzor váží 40 g a je možné ho napájet stejnosměrným napětím od 12 V po 24 V s příkonem do 1,92 W. Pro komunikaci s mikrokontrolérem používá sériovou linku RS-485, pro převod mezi RS485 a UART je použit Transceiver. Senzor je vidět na

obrázku 3.3. Senzor dokáže ignorovat určité vzdálenosti, a tím umožňuje použití ochranného skla mezi senzorem a měřeným objektem, znázorněno na obrázku 3.4.



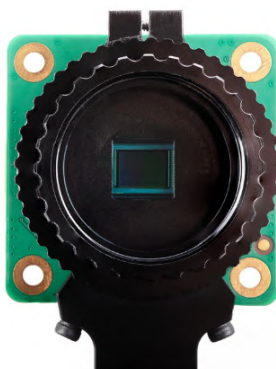
Obrázek 3.3: Laserový snímač vzdálenosti povrchu. [31],



Obrázek 3.4: Funkce měření vzdálenosti pomocí triangulace, senzor SICK OD1-B100C50A15. [31]

Snímání povrchu

Senzorem pro snímání obrazu povrchu je statická HQ kamera pro RaspberryPi s čočkou od firmy ArduCam [4], která bude snímat nasvětlený povrch s pomocí rotujícího zrcátka a LED pásků. Kameru a čočku lze vidět na obrázcích 3.5, 3.6. Kamera je RaspberryPi HQ kamera, která lze připojit přímo na desku RaspberryPi pomocí plochého kabelu. Senzor kamery je Sony IMX477, má 12,3 Megapixelů. Jsou dvě varianty HQ kamery podle připojení čočky, verze M12 a verze CS. Pro připojení vybrané čočky je potřeba CS varianta a adaptér CS na C, který používá čočka ArduCam LN048 s manuálním nastavením.



Obrázek 3.5: HQ kamera pro RaspberryPi verze CS. [26]



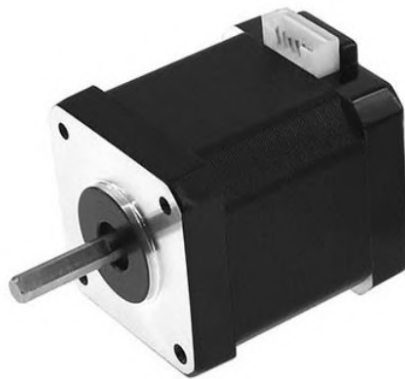
Obrázek 3.6: Čocka pro HQ kameru. [4]

3.1 Rotace bezdrátové snímací hlavy

Pro rotaci je potřeba přesný pohyb, proto jsem vybral krokový motor. Motor bude ovládán mikrokontrolérem pomocí integrovaného obvodu, kontroléru krokových motorů od firmy Trinamic, TMC2209. TMC2209 je schopný řízení krokových motorů s až 2 A. Vybraný krokový motor je konstruován na 1,5 A, pro které lze kontrolér nastavit. Kvůli nárokům na malou velikost jsem plánoval použít krokový motor formátu NEMA14 s vysokým kroutivým momentem. Nicméně kvůli jeho nedostupnosti jsem použil běžně dostupný NEMA17, který je rozměrově větší. Motor je na obrázku 3.7. TMC2209 bude řídit motor napětím 24 V.

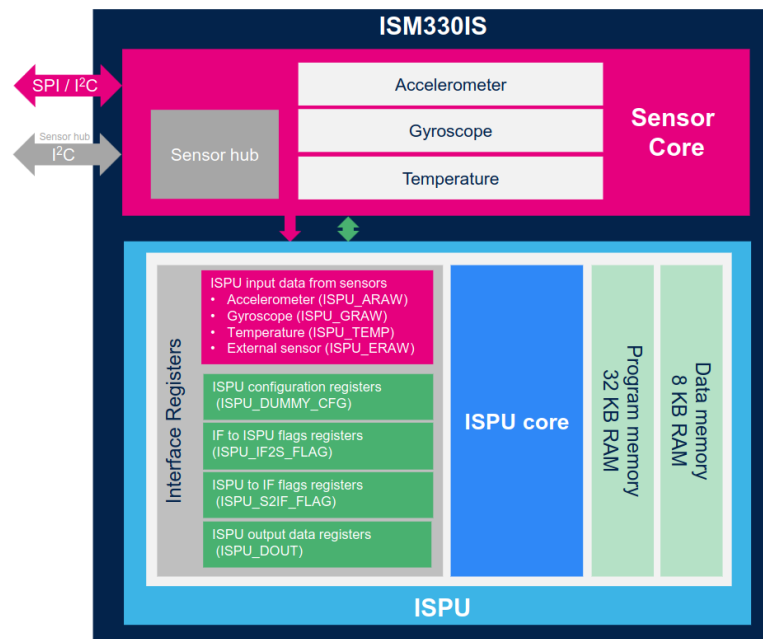
Krokový motor se bude nacházet na statické části zařízení, na jeho hřídeli bude mít ozubené kolo s 10 zuby. Kolo bude otáčet protějším ozubeným kolem s 50 zuby, připojeným na rotační hlavu, tím dojde k rotaci hlavy. Poměr kol 1:5 zajistí ještě jemnější krokování, tím lepší rozlišení a sníží zatížení motoru. Nevýhodou je nižší maximální rychlost otáčení vzhledem k výkonu motoru.

Pro snímání polohy otáčení se bude měřit zrychlení a úhlová rychlost pomocí IMU (Inertial measurement unit), ze kterých se dá dopočítat rychlost a poloha natočení. Jako sekundární zdroj polohy bude samotný počet kroků. Kvůli akumulaci chyby polohy se bude jednou za otočku systém synchronizovat pomocí reflexního spínače, který bude značit nulovou po-



Obrázek 3.7: Použitý krokový motor, formát NEMA17. [14]

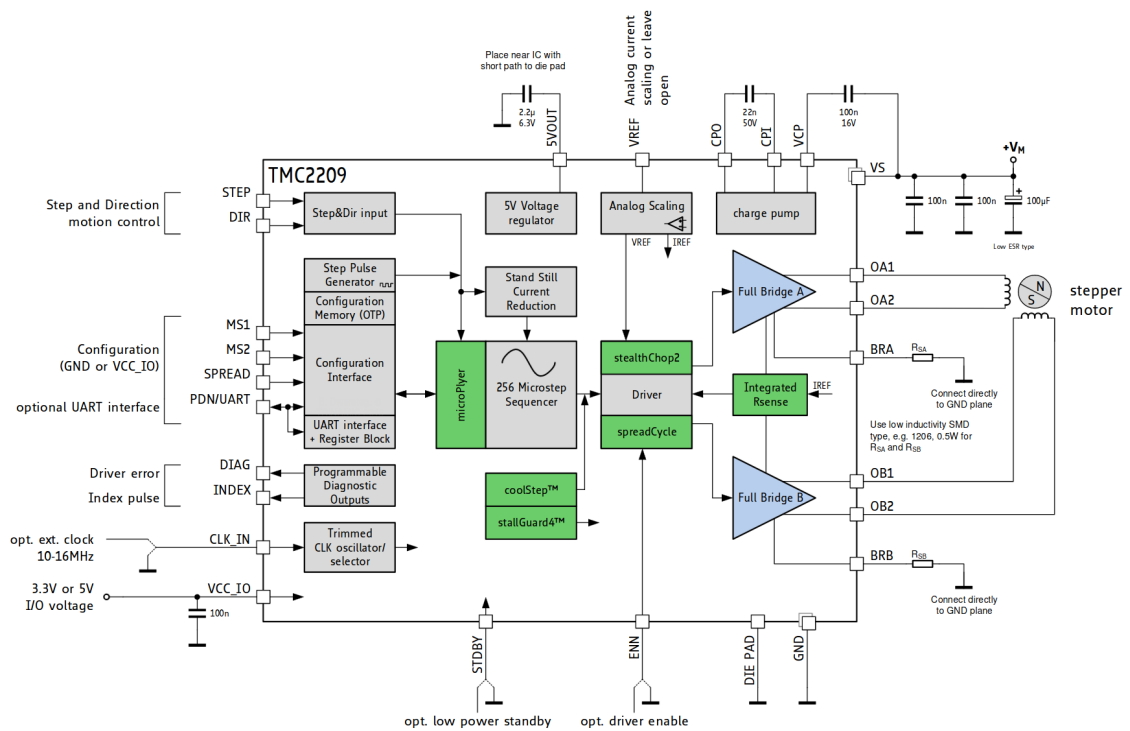
lohu. Vnitřní struktura IMU je zobrazena na obrázku 3.8. Lze využít vnitřní výpočetní jednotku k předzpracování měřených dat, například fúzní filtr. IMU umožňuje komunikaci pomocí I2C nebo SPI, buď používá SPI rozhraní.



Obrázek 3.8: Blokový diagram IMU, obsahuje senzorskou část, registry a výpočetní část. [33]

Řízení bipolárního dvoufázového motoru bude zajišťovat integrovaný obvod TMC2209 [46] od firmy Trinamic. TMC2209 umožňuje mikrokrokování až 256 mikrokroků, je ovládán pomocí signálů step a dir, konfigurace kontroléru probíhá pomocí konfiguračních pinů. Pro ovládání a konfiguraci lze využít i UART, pomocí kterého lze zapisovat a číst registry řadiče. TMC2209 je vidět na obrázku 3.9.

Rotaci napomáhá uchycení rotační hlavy pomocí ložisek na předělu statické a rotační části a na druhém konci rotační hlavy. Uchycení ložisky snižují odpor nutný k rotaci a zároveň umožní stabilnější měření (snižují chyby vlivem různých vibrací). Pro samotnou rotaci bude



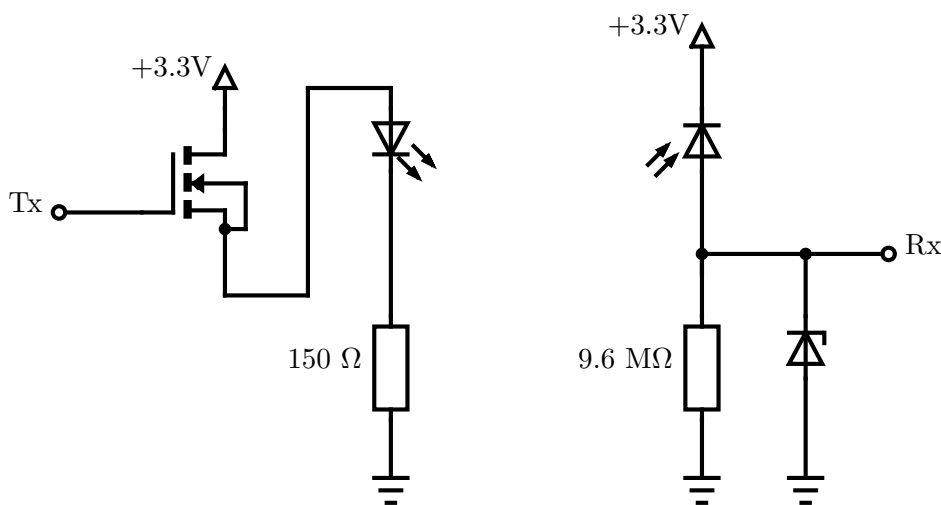
Obrázek 3.9: Integrovaný obvod pro řízení krokových motorů. [46]

sloužit kolo s vnitřním ozubením, umístěné na rotační hlavě, poháněné menším ozubeným kolem připevněným přímo na hřídel krokového motoru, kde krokový motor je připojen ke statické části zařízení.

3.2 Bezdrátová komunikace

Bezdrátová komunikace bude fungovat pomocí IR LED a IR fotodiod, kde IR LED budou vysílat signál a IR fotodiody budou signál zachytávat. Bezdrátová komunikace bude probíhat mezi statickým STM32 a rotujícím STM32 mikrokontrolérem pomocí USART (Universal synchronous/asynchronous receiver transmitter). v mikrokontrolérech STM32L4 je v jednotce USART implementován standard IrDA SIR, který bude použit pro přenos dat. IrDA SIR umožňuje half-duplex, tedy přenos oběma směry, ale ne současně. Pro úplnost obvodu je potřeba použít tranzistor pro vysílací část (tx) a transimpedenční zesilovač [42] a inverter [45] na přijímací straně (rx).

Rotující i statická část budou mít zrcadlené struktury obvodů. Struktura bude 5 IR LED a 5 IR fotodiod, které budou zapojeny paralelně v kruhu. IR LED budou připojeny na USART TX a IR fotodiody budou připojeny na USART RX. USART v IrDA režimu bude fungovat s baud rate 115200. Příklad zapojení vysílače a přijímače je vidět na obrázku 3.10.



Obrázek 3.10: Schéma navrhnutého systému bezdrátové komunikace.

IR LED je vysokorychlostní TSFF5410 [50] od firmy Vishay, která vysílá na vlnové délce (870 nm) a dosahuje frekvencí 24MHz. Kvůli 5 IR LED zapojeným paralelně a každá led je schopná až 100 mA, je nutné použití tranzistoru ke spínání externího napájení k LED, protože takové proudy není mikrokontrolér schopný dodat. Pro baud rate 115200 není potřeba tak vysokých proudů, proto využijí nižší proud. Protějškem je vysokorychlostní PIN Photodiode BPV10NF [47] od firmy Vishay, která filtruje spektrum na rozmezí 790 nm až 1050 nm (tedy infračervené záření). Při zapojení v závěrném směru s 12 v je fotodiode schopna frekvencí nad 100 MHz. Při baud rate 115200 není potřeba tak vysokých frekvencí, pak stačí napětí 3,3V a zapojení v dopředném směru, při výsledné nižší frekvenci. Fotodiode generuje napětí na základě dopadu záření, oproti napětí má lepší linearitu na dopad světla proud generovaný fotodiodou. Výsledný proud z fotodiody převedu na napětí a zároveň zesílím na úroveň 3,3 v pomocí transimpedenčního zesilovače. v rámci standardu IrDA SIR je potřeba výsledný signál ze zesilovače invertovat, tedy s vysokým napětím v klidovém stavu a impulzy v nízkém napětí. Inverzi signálu provedu pullup rezistorem na 3.3V a tranzistorem spínám zem, kde spínací signál je výstupem ze zesilovače.

3.3 Bezdrátové napájení

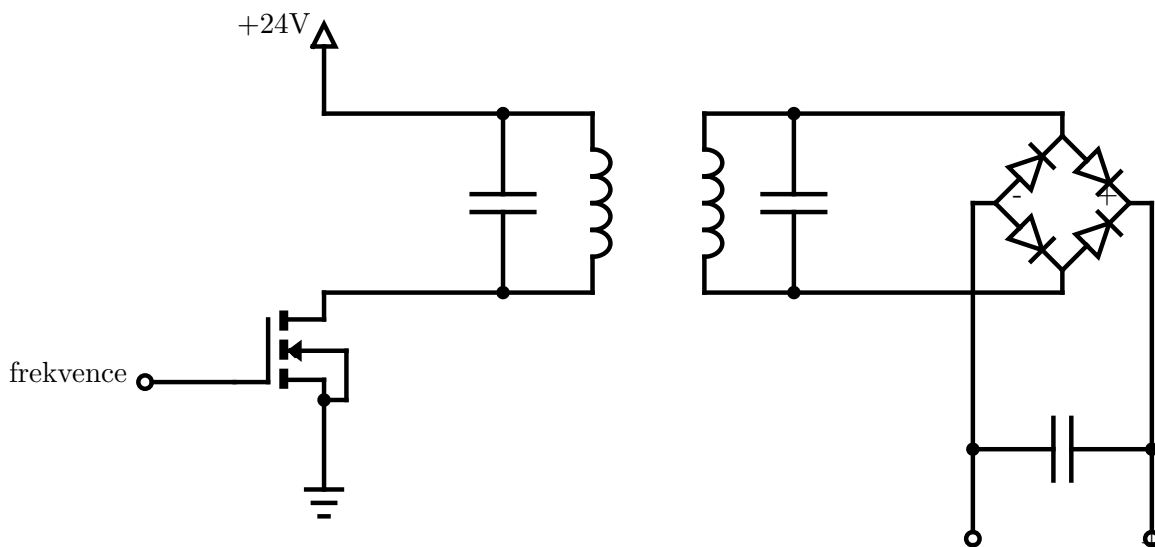
Bezdrátové napájení jsem založil na rezonanční magnetické vazbě. Napájení bude tvořeno dvěma cívkami a příslušnými kondenzátory (aby vznikla rezonance na přenosové frekvenci). Frekvence a kapacita kondenzátoru bude vypočítaná podle indukčnosti cívky. Schéma napájecího systému je na obrázku 3.11.

Na statické straně bude vysílač, který potřebuje přivést vysokofrekvenční AC. Pro účel převodu DC na AC bude použit výkonový vysokofrekvenční MOSFET, který bude napojen na generátor signálu požadované frekvence. Signál nejdříve získám z časovače STM32, signál bude řídit hradlový budič [21], který bude lépe spínat tranzistor.

Ačkoliv přenos energie přes cívku pomocí jednoho tranzistoru je možný a ve výsledku efektivní na zabíranou plochu, je náchylný na poškození zkratovým proudem v případě chyby (není možnost filtrovat stejnosměrnou složku pomocí kondenzátoru v sérii s cívkou). Řešení takového zapojení je popsáno v práci [15]. Proto jsem se rozhodl pro vytvoření můstku pro generaci AC napětí pro cívku. Nevýhoda je větší plocha na desce, proto jsem navrhl dedikovanou desku pro můstek napájení cívky. Můstek umožní zapojení kondenzátoru do série s cívkou, který dokáže filtrovat stejnosměrnou složku proudu (předchází skratu) a propouští pouze střídavou složku proudu (nutná k přenosu energie). Ke správné funkci dostačuje poloviční můstek. Podle zvolené frekvence lze provést rezonanční nebo indukční magnetickou vazbu cívek.

Na rotační straně bude přijímač, který následně provede usměrnění a vyhlazení napájení pomocí kondenzátoru. Výstupem je pak stejnosměrný zdroj napájení pro rotační část zařízení. Kondenzátor bude dostatečně velký, aby vykryl potenciálně nestabilní přenos a stabilizoval výstupní napětí.

Velikost cívky bude co největší, tím bude mít nejlepší efektivitu přenosu. Zároveň se musí cívka vlést do zařízení, které bude mít průměr co nejmenší. Cívka bude vlastní výroby, cívky které se používají pro bezdrátové napájení nejsou správné velikosti pro použití v zařízení.



Obrázek 3.11: Schéma navrhnutého systému bezdrátového napájení.

3.4 Návrh desek plošných spojů

Pro rotační i statickou část zařízení jsem navrhl desky plošných spojů, sloužících jako centrální řízení a pro agregaci dat ze senzorů. Jádrem obou desek jsou mikrokontroléry STM32, které spolu komunikují pomocí IR bezdrátové komunikace. Mikrokontroléry slouží k ovládání aktuátorů, senzorů a sběru dat. Desky plošných spojů jsou vytvořeny jako dvouvrstvé, pro jednoduchost a cenu výroby. Statická deska je navržena ve formátu HAT pro RaspberryPi. Rotační deska je omezena velikostí rotační hlavy. Navrhl jsem i desku pro napájení vysílací cívky, která navíc poskytuje 12V pro větráček chlazení.

Desky plošných spojů umožňují efektivní, kompaktní zapojení součástek, běžné desky jsou vyrobeny z FR4 materiálu, na který jsou přilepeny měděné desky. FR4 (fire retardent 4) je sklolaminát potlačující oheň. Měděné desky jsou leptány podle návrhu. Desky jsou vrtány, frézovány, lisují se prokovy a jsou potaženy několika vrstvami, některé ochranné a některé informační. Navržené desky obsahují napájecí části, zejména konektory a napěťové převodníky. Desky také obsahují datové části, a to jak digitální, tak analogové. Analogové signály jsou náchylné na rušení vysokofrekvenčními digitálními signály, tudíž je dobré oddělit a odstínit analogové a digitální části pomocí zemnicích ploch a prokovů. Pro připojení vnějších zařízení jsou použity konektory Molex Nanofit.

Pro návrh obvodů a desek jsem použil program KiCAD¹, který je opensource, zdarma dostupný a mocný nástroj pro návrh PCB. KiCAD umožňuje návrh schémat obvodů a jejich simulaci pomocí SPICE. Ze schémat umožňuje vytvářet rozložení součástek na PCB a výsledný návrh desky zobrazit ve 3D pro kontrolu výsledku. 3D model lze použít při modelování zbytku zařízení, kde poskytuje informaci o potřebném místě.

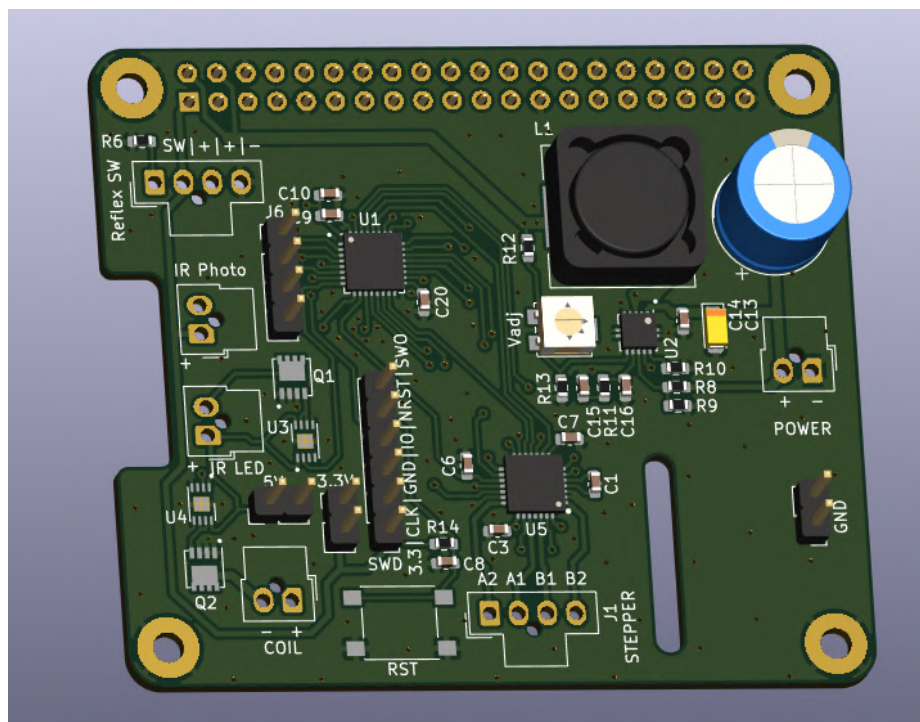
3.4.1 Statická deska plošných spojů

Statická deska má za cíl přívod napájení a jeho distribuci, komunikaci s RaspberryPi, komunikaci s rotační částí a řízení rotace. Statická deska je navržena ve formátu HAT pro RaspberryPi, který udává tvary, rozměry, výřezy a umístění určitých součástek jako 40 pinového konektoru desky. Řízení zprostředkovává mikrokontrolér STM32L432KC, který má jádro Arm Cortex M4 s FPU na frekvenci 80MHz, 256KB flash, 64kB SRAM, 11 časovačů, 2 SPI, 3 USART, 1 LPUART, 1 12-bitový ADC a 2 12-bitové DAC. Mikrokontrolér je programován pomocí SWD (serial wire debug) externím programátorem. Resetovat lze pomocí reset pinu SWD nebo tlačítkem na desce.

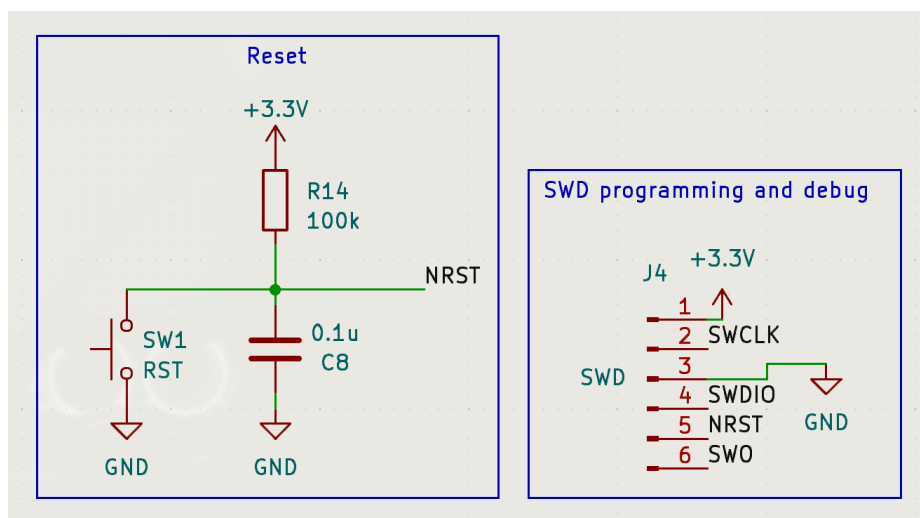
Deska je napájena externím zdrojem stejnosměrného 24V napájení. 24V napájení je využito pro chod motoru a přenos energie k rotační desce bezdrátově. Pro ostatní součástky je potřeba převodu 24 voltového stejnosměrného napětí na stejnosměrné napětí 5V a 3,3V. Převod je zajištěn pomocí spínaného regulátoru napětí TPS54335 [43], jehož výstupní napětí je navrženo na 5V a proud 3A. Pro zpřesnění výstupního napětí je použit variabilní rezistor, kterým je možné doladit výstupní napětí. Návrh napěťového převodníku jsem přebíral z původního řešení² a lehce upravil. Pro získání napětí 3,3V jsem se rozhodl využít převodníku z 5V na 3,3V, který je již umístěný na RaspberryPi, a tím ušetřit na součástkách a místě na desce. Napájení RaspberryPi tedy zajišťuje statická deska napětím 5V. Pro stabilizaci napájení je na desce 100 μ F kondenzátor, který stabilizuje napětí 24V. Součástky mají blízko jejich vstupních napájecích pinů menší keramické kondenzátory pro stabilitu napájení součástky, většinou vybrány podle doporučení výrobce.

¹www.kicad.org

²MOLE <https://strade.fit.vutbr.cz/git/imalanik/BBX-mini>



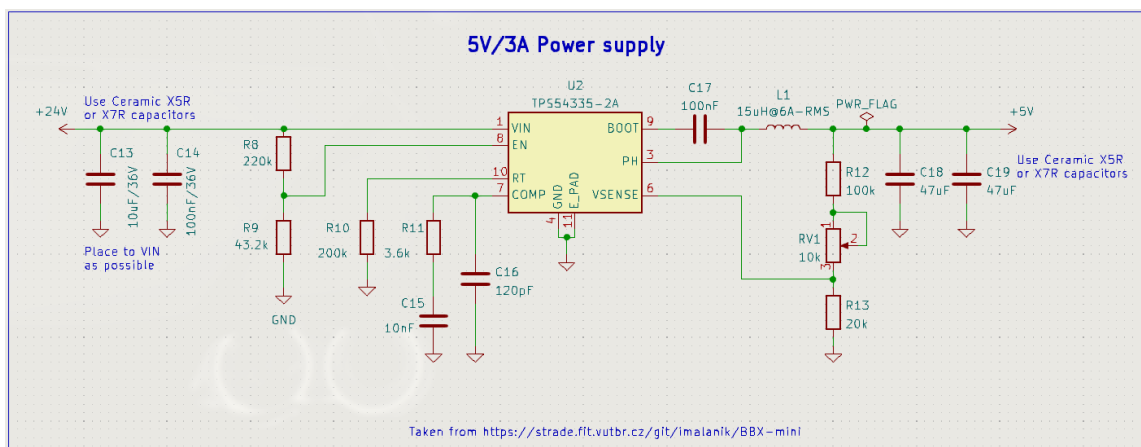
Obrázek 3.12: Statická deska plošných spojů.



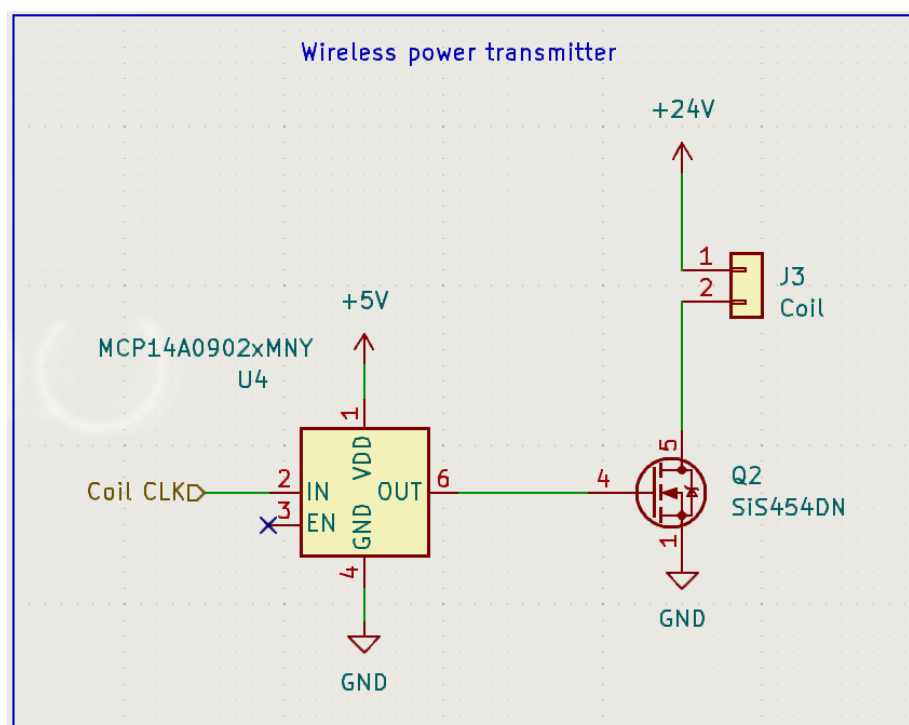
Obrázek 3.13: Programování, debug a reset mikrokontroléru.

Statická deska zajišťuje napájení rotační části, a to bezdrátově elektromagnetickou indukci pomocí cívek. Pro přenos energie je nutné přeměnit stejnosměrné napětí na střídavé. Toho je dosaženo za pomoci hodinového signálu z mikrokontroléru a konektorem s 24V a 5V napájením pro připojení desky generující střídavý proud cívkou. Pro připojení cívkou jsem použil konektory Molex Nanofit. Obvod lze vidět na obrázku 3.15.

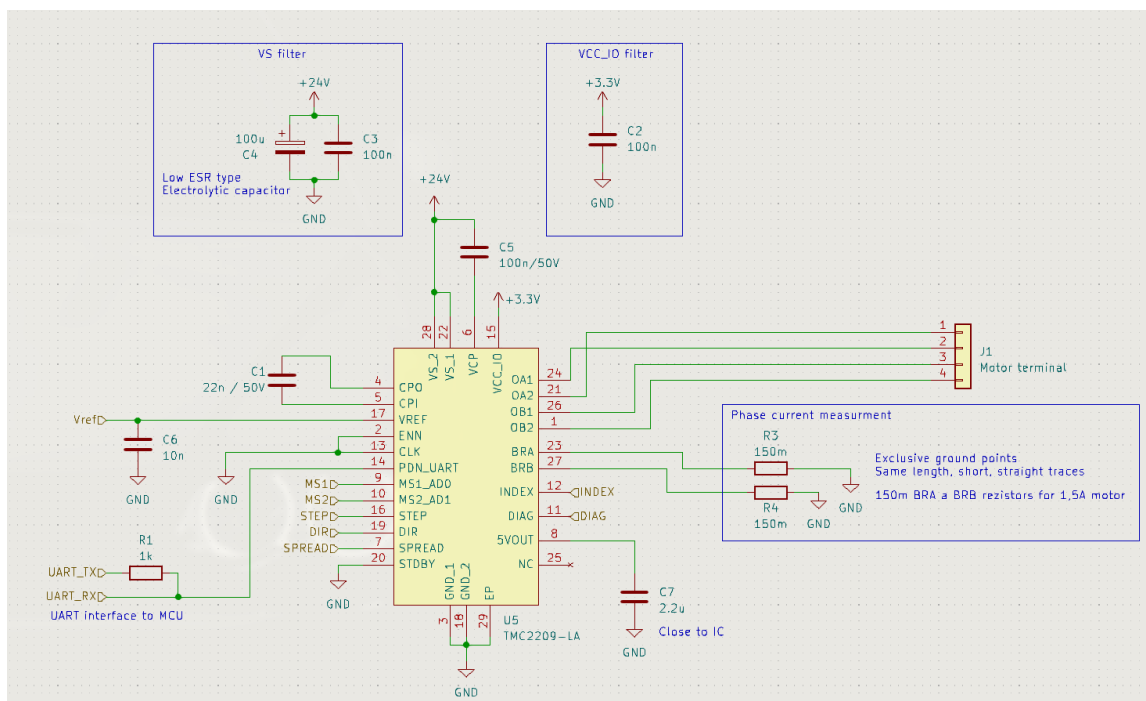
K rotaci rotační části jsem použil krokový motor, který bude připojen ke statické desce pomocí konektoru Molex Nanofit. Motor bude připojen 4 vodiči, 2 pro každou fázi. Rotaci bude řídit mikrokontrolér pomocí řadiče krokových motorů TMC2209. TMC2209 interně



Obrázek 3.14: Napájení statické desky.

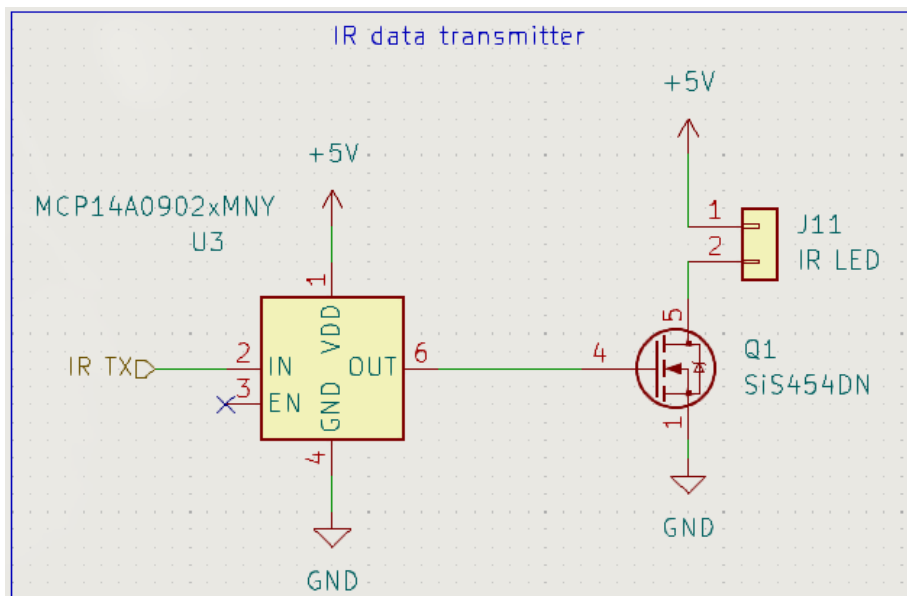


jsem použil 150 mΩ, podle tabulky výrobce je jedná o hodnotu pro 1,5 A motor. Při změně motoru je vhodné pro správnou funkci vyměnit rezistory. Pomocí DAC mikrokontroléru generuji referenční napětí pro TMC2209, které reguluje výsledný výkon motoru. Vedení tohoto signálu jsem se snažil co nejvíce odstínit od okolního rušení. Protože se signál nemění moc rychle, přidal jsem malý filtrační kondenzátor pro lepší stabilitu signálu. TMC2209 je řízen mikrokontrolérem, pohyb je možný pomocí Step a Dir vodičů a dodatečné funkce lze nastavovat ostatními vodiči. Druhým způsobem je nastavování vnitřní paměti pomocí UART (nastavuje mikrokontrolér) i za pomoci UART lze řídit krokování. Pro detekci Nulové polohy jsem se rozhodl použít reflexní spínač [48], který je připojen konektorem Molex Nanofit. Konektor je zapojen k napájení a obsahuje předřadný rezistor pro omezení proudu IR LED a pulldown rezistor pro výstup k mikrokontroléru, kde výstup generuje fototranzistor. Obvod lze vidět na obrázku 3.16.

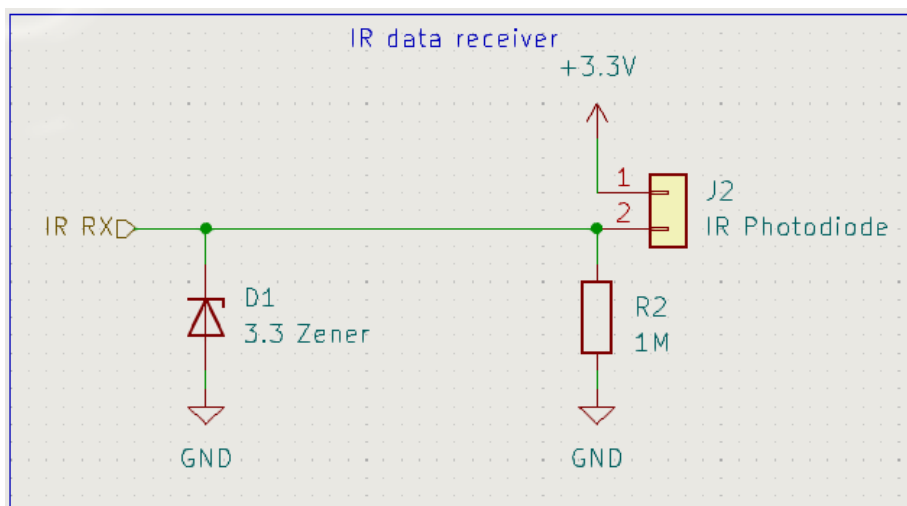


Obrázek 3.16: Obvod řízení rotace.

Bezdrátový přenos dat s rotační deskou je řešen pomocí vysílače a přijímače infračerveného světla. Na desce plošných spojů je připraven pouze řídicí obvod a samotné zapojení fotodiody a LED je externím řešením, které je připojeno pomocí konektorů Molex Nanofit. Datové signály jsou připojeny na UART mikrokontroléru. Vysílač je řešen spínáním tranzistoru hradlovým budičem napojeným na UART TX. Tranzistor jsem použil z důvodu vyšších proudů než je schopný mikrokontrolér poskytnout. Pro lepší charakteristiku spínání jsem použil hradlový budič. Zenerova dioda slouží pro ochranu mikrokontroléru, pulldown rezistor je nevyužit. Transimpedenční zesilovač, navazující tranzistor s příslušnými rezistory jsou řešeny dodatečně, externě mimo desku. Obvody vysílače a přijímače jsou vidět na obrázcích 3.17, 3.18.



Obrázek 3.17: Bezdrátový vysílač dat na statické desce.



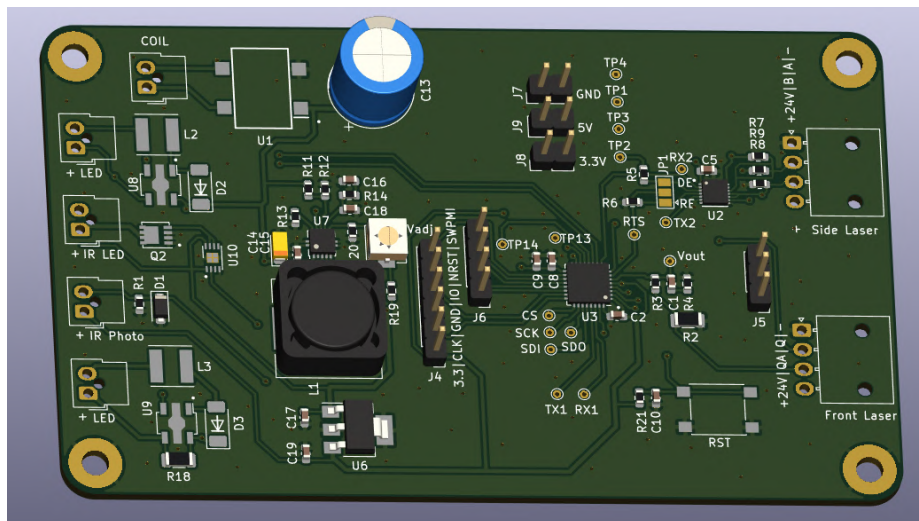
Obrázek 3.18: Bezdrátový přijímač dat na statické desce.

3.4.2 Rotační deska plošných spojů

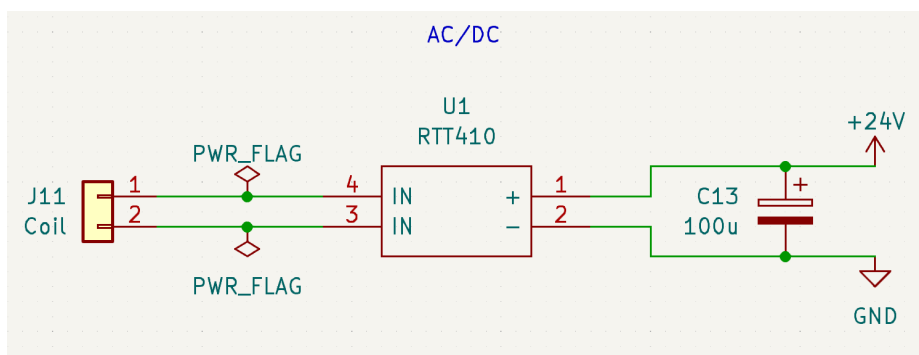
Rotační deska má za cíl integrovat senzory na rotační straně zařízení, předzpracovat získaná data a komunikovat se statickou částí. Obrázek 3.19 ukazuje model desky.

Napájení rotační části zajišťuje rotační deska, která přijímá energii vyslanou statickou deskou pomocí cívky. Přijímaná energie je ve formě střídavého napětí, které je před využitím dalšími částmi zařízení nutno usměrnit. Pro usměrnění jsem použil můstkový usměrňovač RTT410-13 [7], schopný usměrnit až 4 a a nárazově i 100 A, se závěrným napětím 1 kV. Po usměrnění jsem použil 100 μ F elektrolitický kondenzátor jako zásobník přijímané energie. Schéma je na obrázku 3.20.

Pro získání nižších a stabilních napětí 5 v a 3,3V jsem použil převodníky. Pro získání 5 v jsem použil stejný spínaný regulátor napětí jako na statické desce. Pro převod 5 v na 3,3

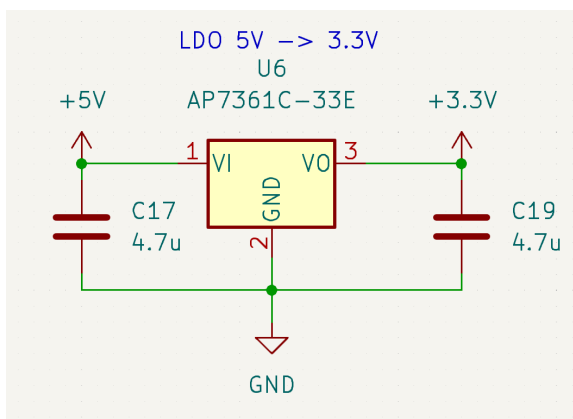


Obrázek 3.19: 3D model navrhnuté desky.



Obrázek 3.20: Obvod přijímače bezdrátového napájení s uměrněním a filtrovacím kondenzátorem.

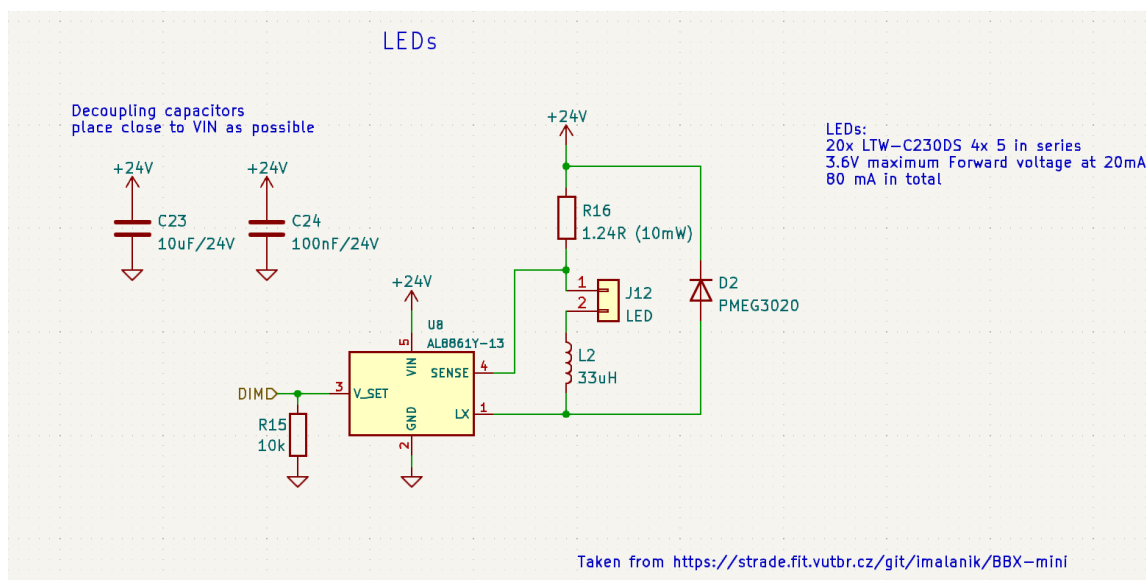
v jsem použil LDO MCP1826S-3302E/DB [22] schopný poskytnout napětí 3,3 v a proud až 1 A, schéma je na obrázku 3.21.



Obrázek 3.21: Schéma převodníku napětí z 5 v na 3,3 V.

Mikrokontrolér pro rotační desku jsem vybral STM32L432KB, je podobný jako u statické části jen se zmenšenou flash na 128 kB. Menší flash dostačuje, protože mikrokontrolér rotační části bude méně výpočetně zatížen. Ostatními parametry je shodný s STM32L432-KC. Programovaný je také externě programátorem pomocí SWD a reset je řešen také přes SWD a tlačítko na desce 3.13. Bezdrátová komunikace na rotační desce je zrcadlením bezdrátové komunikace statické desky 3.17, 3.18.

Návrhy budičů LED a obvodů pro přední a boční laser jsou založeny na předchozím řešení³. Rotační deska zajišťuje osvětlení snímaného povrchu, tudíž jsou na desce připraveny budiče LED AL8861Y-13 [8] pro levý a pravý LED pásek. Budič LED AL8861Y-13 je stepdown DC-DC převodník schopný efektivního buzení sérií LED pomocí většího napětí než je napětí na LED, pracuje se vstupním napětím 4,5 v až 40 v a dokáže poskytovat až 40W. AL8861Y-13 je schopný regulovat svítivost pomocí signálu z mikrokontroléru, a to buď napětím nebo PWM, v rozsahu 5% až 100%. Svítivost je řízena pro každý pásek zvlášť, pomocí DAC mikrokontroléru. Schéma zapojení jednoho budiče lze vidět na obrázku 3.22.

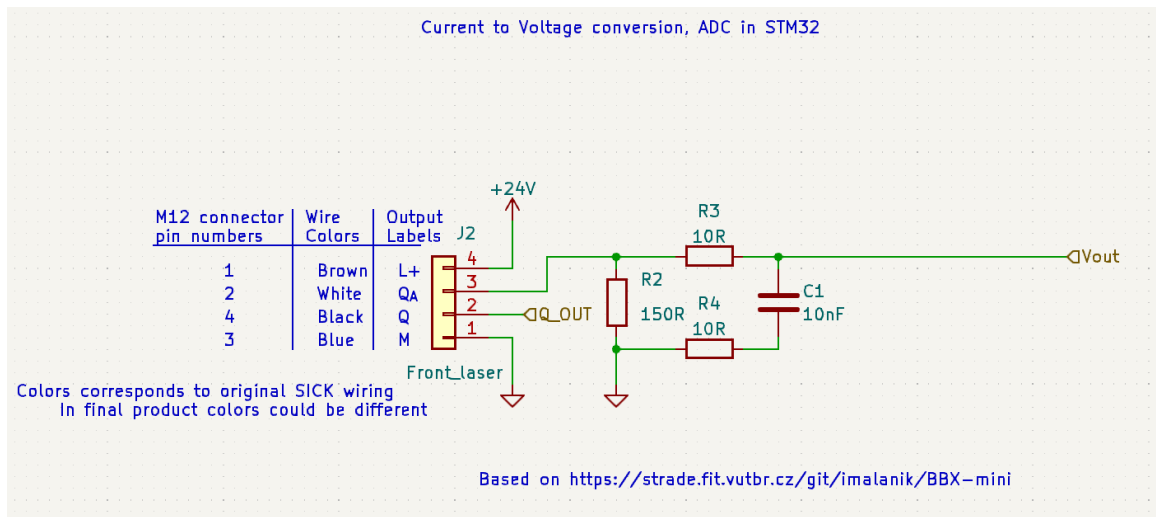


Obrázek 3.22: Schéma obvodu budičů LED.

Přední laser je určen pro snímání polohy zanoření, jeho výstupem je proudová smyčka od 4 mA po 20 mA. Pro získání hodnot mikrokontrolérem je potřeba převést proud na napětí, které mikrokontrolér převede na hodnotu pomocí ADC. Obvod je na obrázku 3.23. Senzor bude připojen čtyřvodičovým konektorem, dva vodiče pro napájení senzoru a analogový a digitální výstup. Analogový výstup udává hodnotu vzdálenosti a digitální je možné naprogramovat například na přesáhnutou hodnotu vzdálenosti. Pro převod proudu na napětí byl vybrán 150 Ω rezistor. v obvodu jsou použity 2 rezistory a kondenzátor pro filtraci napětí.

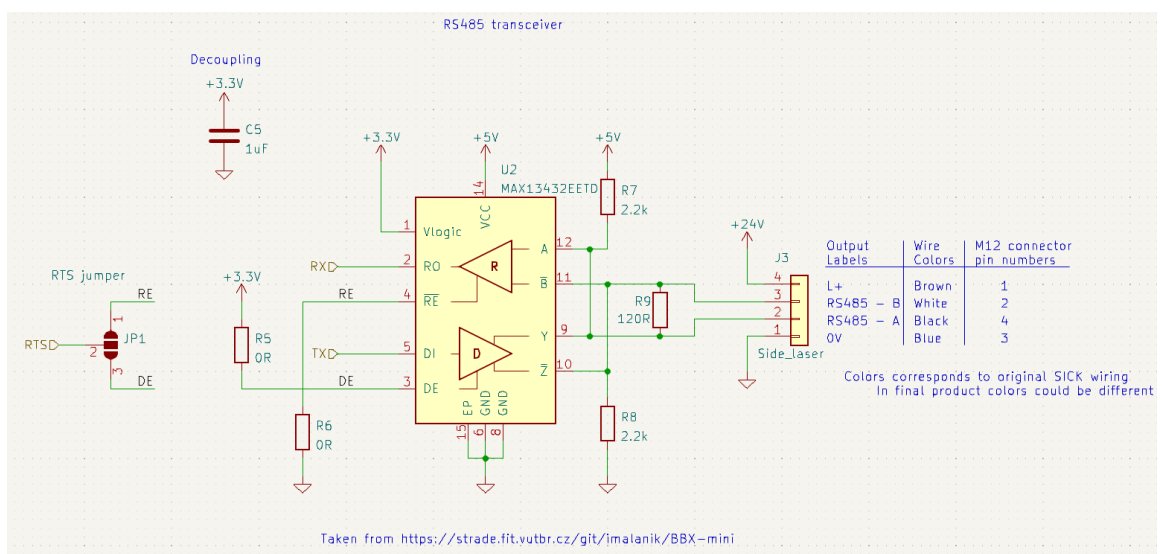
Boční laser je určen pro přesné měření hloubky povrchu. Senzor používá pro výstup RS485, tedy je čtyřvodičovým kabelem připojen na desku, 2 vodiče jsou napájení senzoru a 2 vodiče jsou RS485. Obvod lze vidět na obrázku 3.24. Pro komunikaci s mikrokontrolérem jsem použil transceiver MAX13432EETD [20] převádějící UART a RS485. Tedy mikrokontrolér komunikuje se senzorem pomocí UART, transceiver převede UART na RS485, který

³MOLE <https://strade.fit.vutbr.cz/git/imalanik/BBX-mini>



Obrázek 3.23: Schéma obvodu předního laseru, převod proudové smyčky na napětí.

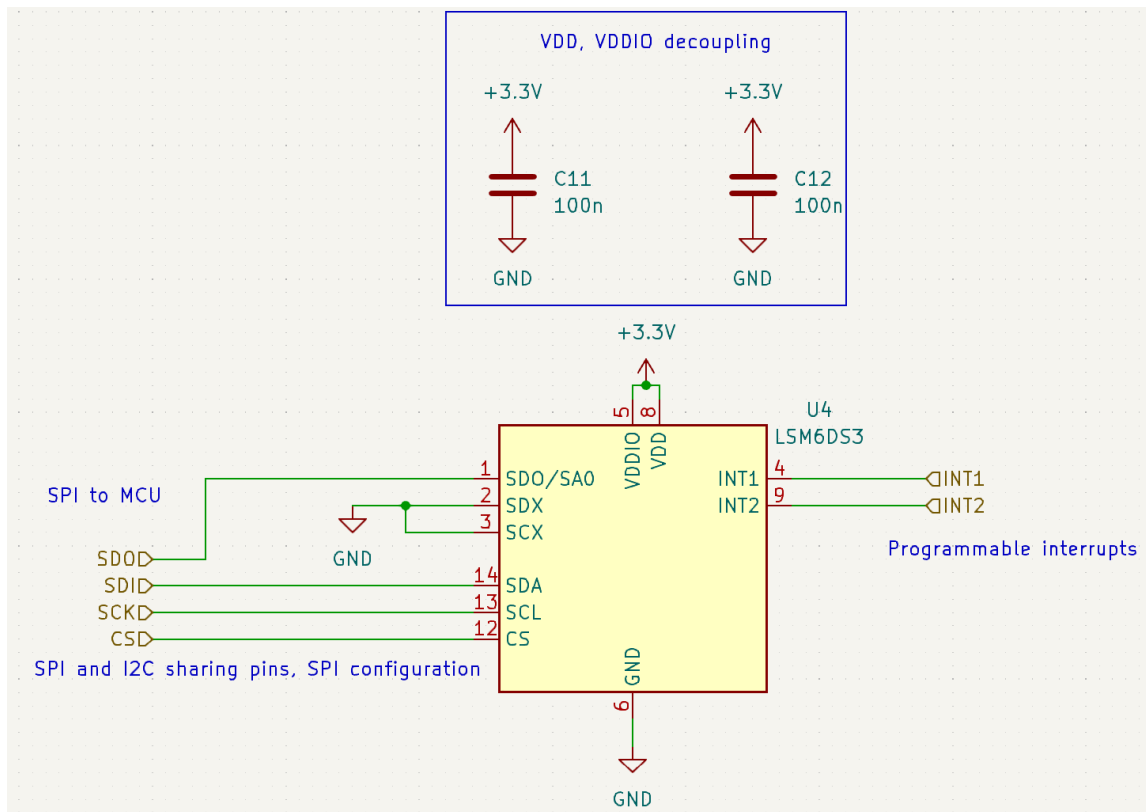
je připojen na konektor senzoru. Součástí obvodu je terminační rezistor, který tlumí odrazy signálu a dva rezistory, jeden pro každý diferenční vodič, pro uchování definovaného stavu při klidové sběrnici. Jeden vodič má pullup rezistor, druhý pulldown.



Obrázek 3.24: Schéma obvodu bočního laseru, převod USART/RS485.

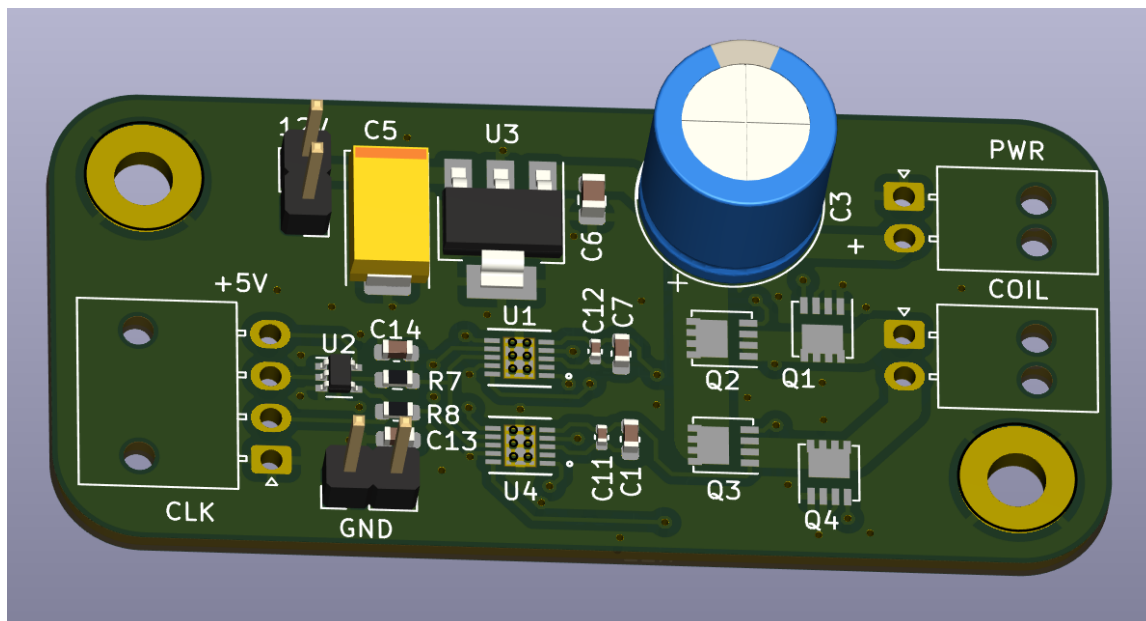
IMU (Inercial measurment unit) slouží k získání polohy natočení hlavy. IMU ISM330IS [33] je od firmy ST, skládá se z 3-osého digitálního akcelerometru a 3-osého digitálního gyroskopu. Obsahuje i výpočetní jednotku, která je programovatelná i pomocí ST NanoEdge AI Studio a má 32 kB programové RAM, 8 kB datové RAM a FPU podporující sčítání, odečítání a násobení. IMU je napájeno 3,3 v se spotřebou 0,59 mA. Akcelerometr je schopen měřit zrychlení až 16 g a gyroskop je schopen až 2000 dps (degrees per second). ISM330IS obsahuje i teplotní senzor a je schopen fungovat jako senzor hub, tak je schopen připojit další senzory pomocí I2C. IMU je umístěno uprostřed desky, tím minimalizuje akceleraci ve dvou osách. IMU je připojeno k mikrokontroléru pomocí SPI a zároveň 2 piny přerušení,

které lze naprogramovat v IMU. IMU má senzory, paměť a výpočetní jednotku, ke kterým je možný přístup přes SPI. Schéma obvodu lze vidět na obrázku 3.25.



Obrázek 3.25: Schéma zapojení IMU ISM330IS.

3.4.3 Deska napájení cívky

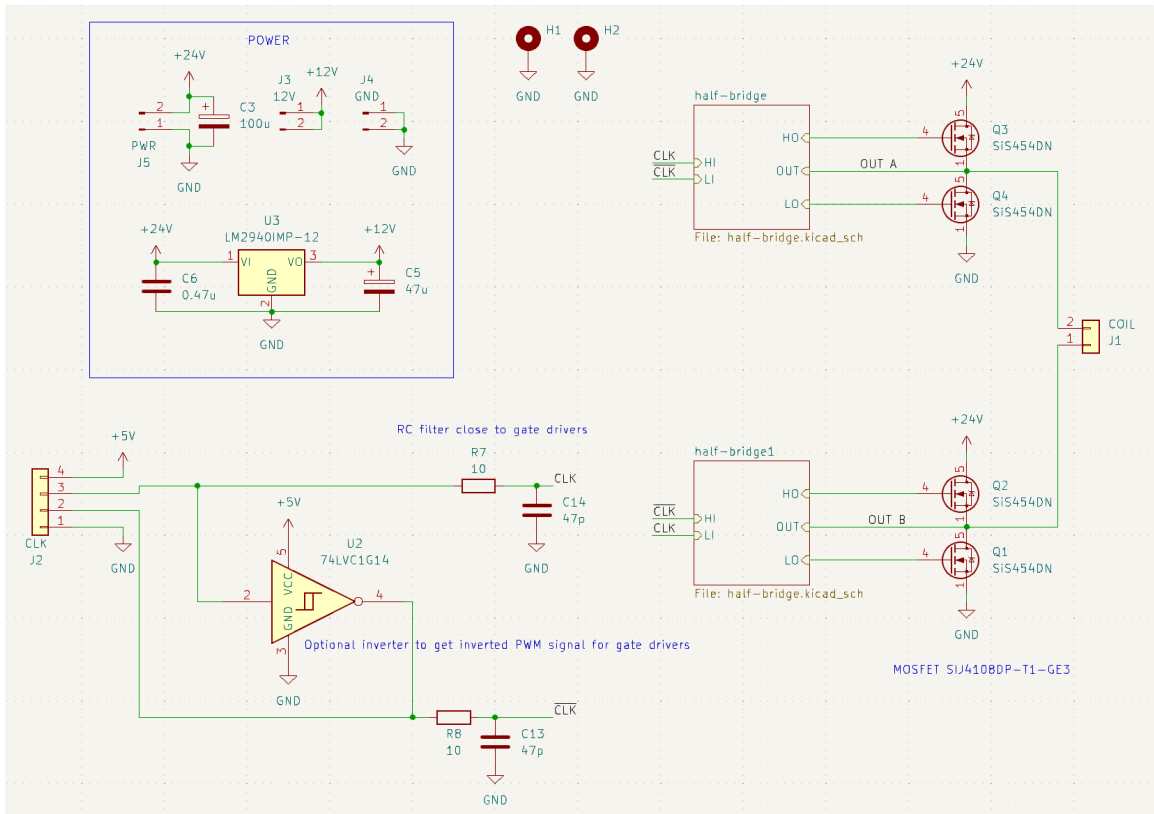


Obrázek 3.26: 3D model navrhnutého PCB pro napájení cívky.

Deska pro napájení vysílací cívky 3.26 má za úkol vytvořit střídavé napětí ze stejnosměrného napětí 24 V, o dané vstupní frekvenci. Deska má 3 konektory. Jeden konektor je výkonové napájení 24 V a zem. Druhý konektor přivádí hodinový signál, možnost je přivést i invertovaný hodinový signál nebo použít invertor [24] na desce, pro který je nutné přivést napájení 5 V. v případě zapojení pouze poloviny můstku je potřeba propojit místo tranzistorů druhé poloviny můstku kondenzátory. Třetím konektorem je připojení cívky, která je opatřena příslušným kondenzátorem.

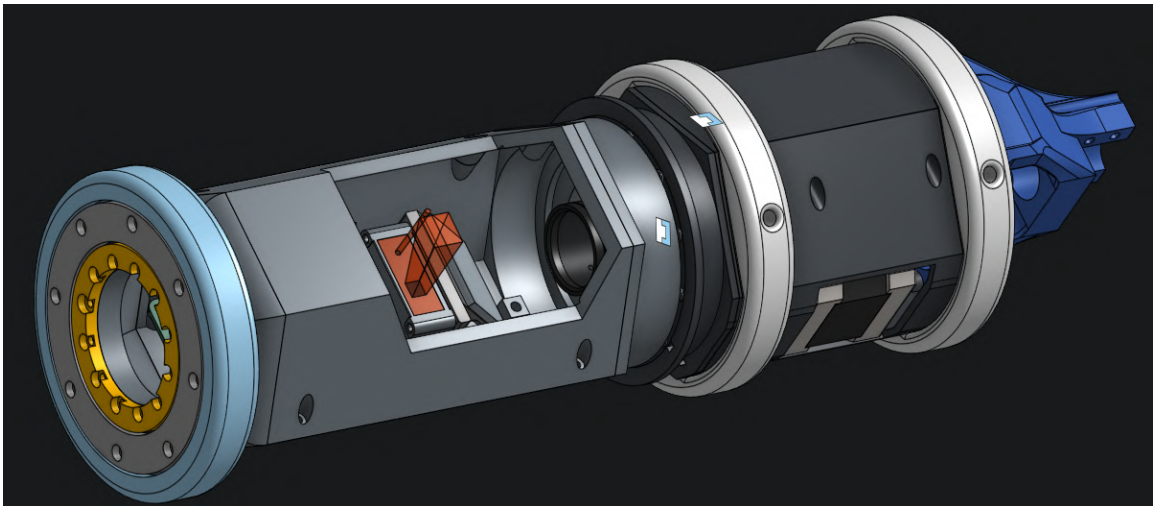
Pro napájení hradlových budičů jsem použil LDO, které převádí 24 V na 12 V [41]. LDO jsem použil zejména pro jednoduchost oproti spínanému regulátoru napětí. 12 V lze využít pro napájení chladičového větráčku. Hradlové budiče LM5108 [44] jsou určeny pro spínání polovičních můstků, proto jsou použity 2 budiče, které dohromady ovládají celý můstek, tedy 4 tranzistory. Rozdílem budičů je prohození hodinových signálů (normálního a invertovaného), které spínají jednotlivé tranzistory, hodinové signály jsou filtrovány RC článkem. LM5108 je budič, který oproti LM5109 zamezuje zkratu přes tranzistory polovičního můstku (oba tranzistory seplé). Hradlový budič má výstupy pro vrchní a spodní tranzistor, výstupy jsou osazeny rezistory pro omezení tzv. ringing, tedy zákmitů na hranách při spínání. Jsou umožněny i modifikace různé doby nabíjení a vybíjení gate tranzistoru pomocí diody a rezistoru. Pro správnou funkci budiče je potřeba bootstrap kondenzátor, který zajistí správné napěťové hladiny pro spínání tranzistorů. Vybral jsem kondenzátor 100 nF a dodatečný 1 nF pro filtraci vysokých frekvencí. Pro spínání jsem vybral tranzistory Vishay PowerPAK_1212-8 [49], které mají nízký odpor, tedy menší ztráty a vyšší efektivita cívky.

Obrázek 3.27 ukazuje model desky.



Obrázek 3.27: Schéma zapojení desky pro napájení cívky.

3.5 Návrh mechanického 3D modelu



Obrázek 3.28: 3D model kompletního zařízení.

Model zařízení lze vidět na obrázku 3.28. Mechanické části jsem navrhoval a modeloval v programu Onshape. Onshape je 3D CAD software hostovaný na serverech a dostupný

z webového prohlížeče, to umožňuje využít vysoký výkon serveru za pomoci internetového spojení.

Výsledný model jsem vyráběl pomocí 3D tisku. Tiskl jsem běžným materiálem PLA, který je dostupný, levný a jednoduchý pro tisk. Použil jsem 3D tiskárnu Ender 5. Aby mohl být model vytisknut na 3D tiskárně, je ho potřeba převést na instrukce pro tiskárnu. Formát tiskárny je gcode, který se mimo jiné používá ve strojírenství na CNC strojích. Gcode obsahuje seznam souřadnic, podle kterých je stroj řízen. Pro převedení z modelu na gcode se používají programy nazývané slicer, protože model rozřezou na vrstvy a jednotlivé trasy 3D tiskárny. Slicer řeší vytvoření takového gcode, podle konfigurace. Konfigurovat lze tloušťku stěn, výplň, rychlost pohybu tisknoucí hlavy, teploty tisku, podpěry, metody zlepšující přilnavost. Existuje mnoho metod vytváření gcode z modelu, stále je velký vývoj nových metod. Pro vytvoření gcode jsem použil program Cura od firmy Ultimaker, kteří se zabývají vývojem a výrobou 3D tiskáren. Cura ovšem funguje s různými druhy tiskáren.

Základním tvarem těla zařízení je šestiúhelník, jeho výhody jsou rovnoběžné protější plochy, velký vnitřní objem, velké plochy jednotlivých stěn. Ostré hrany, které mohou mít kontakt s okolím, jsem zaoblil nebo zkosil, tím se omezí možnost zaseknutí. Pro správnost měření jsou přidány centrační kroužky, které vycentrují zařízení v dutině.

Pro lepší a konzistentní rotaci jsem použil ložiska, jedno z každé strany rotační hlavy. Ložiska jsou jednořadá kuličková KINEX 61812-2RS 9 mm široká, 10 mm dlouhá, s vnitřním průměrem 60 mm a vnějším průměrem 78 mm. Ložiska jsem vybral hlavně kvůli malé šířce, která umožňuje menší průměr zařízení. Rotační hlavou otáčí motor pomocí ozubeného kola na krokovém motoru a protějšího vnitřního ozubeného kola, vytisknutých na 3D tiskárně. Vnitřní ozubené kolo zároveň slouží k připevnění rotační hlavy na vnitřní část ložiska. Centrační kroužek na přední straně zařízení je připojen na ložisko, proto se skládá ze dvou částí, které se sešroubují, tím se pevně připojí na vnější stranou ložiska.

Pro uchycení laserových snímačů a zároveň i zrcátka pod úhlem 45° jsem vytvořil rámeček, do kterého se senzory přišroubují. Rámeček lze jako celek vyjmout, a tím se lépe dostat k desce plošných spojů. Rámeček je zkonstruován tak, aby boční laser byl kolmo na snímaný povrch a dopředný laser má možnost lehké úpravy směru pro vycentrování laseru. Pro uchycení IR LED a IR fotodiod jsem vytvořil kroužek s dírami na diody. Fotodiody jsou oproti LED zapuštěny, aby se omezilo ozáření z okolních LED. Kroužek statické strany je nasunut na čočku kamery a přichycen šroubem k PCB kamery. Kroužek rotační části má stojan zakončený čepem, který jde připojit na stěnu šestihranu rotační části, potřípadě lze upevnit šroubem. Kroužek je vytvořen, aby byl nasunut na čočku kamery, a tím nestínil kameře. Uchycení kolem čočky obou kroužků zajistí správnou orientaci diod.

Pro uchycení jednotlivých částí zařízení jsem použil 3 mm šrouby a mosazné tepelně lisované 3 mm závity do plastů. Pro uchycení RaspberryPi, statické desky a desky kamery jsem použil šrouby a závity 2,5 mm, kvůli rozměrům děr na RaspberryPi a PCB kamery.

Kapitola 4

Implementace

K vývoji a programování firmwaru jsem použil STM32CubeIDE¹. STM32CubeIDE je integrovaný vývojový systém firmy ST pro mikrokontroléry STM32, je dostupný pro více operačních systémů (Windows, Linux a macOS). STM32CubeIDE je založen na Eclipse, umožňuje vývoj C/C++, debugování, grafické rozhraní pro konfiguraci pinů, periférií, hodinových signálů, podle kterých generuje inicializační kód nezávisle na uživatelském kódu. Programovat lze přímo registry nebo je možnost využít knihovny HAL (Hardware Abstraction Layer), která zjednodušuje programování, někdy za cenu výkonu. Knihovny HAL zrychlují programování běžných problémů.

K programování mikrokontrolérů STM32 jsem využil vývojový kit STM32 Nucleo, který obsahuje programátor. Programátor jde pomocí jumper pinů ST-LINK nastavit na programování interního STM32 nebo externího mikroprocesoru pomocí SWD pinů. Programátor jsem připojil k počítači pomocí USB a pomocí kabelů připojil SWD na programovanou desku. Následně jsem přes STM32CubeIDE naprogramoval mikrokontrolér STM32 na desce.

K sestrojení kroužků pro bezdrátovou komunikaci jsem vytiskl rámeček, do kterého jsou vloženy IR LED a IR fotodiody. Fotodiody jsou posunuty směrem dozadu od vysílací čočky LED, aby omezovali nechtěné ozáření. IR LED jsou zapojeny paralelně a na přívodním kabelu mají předřadný rezistor. IR fotodiody jsou také zapojeny paralelně, anodou jsou připojeny na zem a anodou na transimpedanční zesilovač. Pro zesílení používá 100 k Ω rezistor. Výstup ze zesilovače je invertován pomocí tranzistoru a pullup rezistoru. Invertovaný signál vede na vstup mikrokontroleru.

K sestrojení cívek jsem vytiskl na 3D tiskárně plastové kroužky, které jsem polepil obostrannou lepící páskou, na kterou se jednodušeji vine cívka. Cívka je tvořena 10 závitů, do série s cívkou jsem připojil 100 nF kondenzátor.

4.1 Zapojení systému

Zařízení je rozděleno na rotační a statické části. Statická část má na jedné straně ložisko, do kterého se zasune rotační část. Na konec rotační části, zevnitř statické se přišroubuje ozubené kolo, kterým se pevně spojí obě části a uzamče se ložisko. Následně lze přimontovat kroužek pro bezdrátovou komunikaci ke kameře pomocí 2,5 mm šroubku a kamera ke stojanu pomocí standardního šroubu pro kamerové stativy. Stojan lze následně přišroubovat ke stěně dvěma 3 mm šrouby. K RaspberryPi lze připojit kameru pomocí plochého kabelu a statickou desku jako HAT k 40 pinovému konektoru. Ve statické desce je výřez na

¹<https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeide.html>

plochý kabel, proto je nutné nejdříve připojit statickou desku nebo protáhnout plochý kabel výřezem v desce. 40 pinový konektor poskytuje napájení a komunikaci mezi RaspberryPi a statickou deskou. Následně jde přišroubovat RPi se statickou deskou ke statické části pomocí 2,5 mm šroubů a připojit ke statické desce konektory reflexního spínače, IR diody pro bezdrátovou komunikaci.

Pro napájení slouží externí 24 v stejnosměrný zdroj, použil jsem 150 W od firmy MeanWell. Pro připojení zdroje ke statické desce slouží dvoulinka zakončená konektorem Molex Nanofit. Na statické desce je konektor s napájením 24 v určený pro desku s napájením cívky, ze statické desky vede konektor pro hodinový signál cívky, který je potřeba zapojit do desky napájení cívky. K desce napájení cívky je potřeba připojit vysílací cívku. Na konec zapojení statické části lze připojit větráček našroubovaný na držáku zařízení k 12 v a zemi na desce napájení cívky, připojit krokový motor, jehož hřídel je potřeba zasunout do ozubeného kola rotační části. Přišroubovat vrchní kryt s motorem a na závěr přišroubovat držák zařízení ze zadu statické části. Počítač lze připojit pomocí Ethernetu k RaspberryPi a připojit se na něj pomocí SSH.

Prvním krokem k sestavení rotační části je přišroubovat rotační desku k rotační části a provléct kroužek bezdrátové komunikace kolem konce čočky, následně připojit stojan kroužku na čep na spodní stěně rotační části. Dalším krokem je připojení konektorů cívky a bezdrátové komunikace na rotační desce. Na kostru držící zrcátko je potřeba přišroubovat nejdříve boční laserový senzor a následně dopředný laserový senzor. Před přišroubováním kostry k rotační části je lepší připojit laserové senzory k rotační desce a zapojit led pásky, které jsou na krytu rotační části k rotační desce a finálně kryt přišroubovat. Sestavená rotační hlava je na obrázku 4.1.

Poslední část je přimontování vystředovacích kroužků pro daný průměr hlavně na ložisko rotační části a oba konce statické části. Vystředovací kroužky statické části jsou identické, nasunuty přes šestihran a přimontovány třemi 3 mm šrouby. Pro přichycení vystředovacího kroužku na ložisko na přední části rotační hlavy je potřeba nejdříve nasunout vystředovací kroužek na vnější část ložiska a přišroubování fixačním kroužkem vnější část ložiska. Následně lze nasunout ložisko na rotační hlavu a přichytit vnitřní část ložiska pomocí menšího fixačního kroužku.

4.2 RaspberryPi

Na RaspberryPi je použit operační systém Raspberry Pi OS založený na linuxové distribuci Debian, který je nainstalovaný na SD kartě. Raspberry Pi OS používá místo BIOS konfigurační soubor /boot/config.txt, ve kterém je potřeba nastavit SPI a kameru. Připojení na RaspberryPi je přes Ethernet, pomocí SSH. Pro připojení je potřeba IP adresa RaspberryPi a připojit se na uživatele pi a heslem pi. Po připojení je možné v domovském adresáři spouštět programy pro získání dat a komunikaci.

Programy pro RaspberryPi jsem psal v programovacím jazyce C++, fungují jako na běžném Linuxu. v RaspberryPi konfiguraci je potřeba nastavit kameru na HQ camera (IMX477) [26]. Pro získání obrazu kamery jsem využil demonstračních aplikací knihovny libcamera². Knihovna libcamera existuje pro programovací jazyk C a Python. Pro zobrazení videa přes SSH lze spustit SSH s podporou protokolu X. Pro zobrazení videa je použit program libcamera-still. libcamera-still lze použít s parametry:

²https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/camera_software.html#use-libcamera-with-qt



Obrázek 4.1: Náhled na zapojenou rotační hlavu, jde vidět kamera, IR komunikační kroužek, zrcátko a boční laser.

- -t0 pro spuštění kamery do přerušení,
- -timelapse udává timeout mezi snímky v milisekundách,
- -qt-preview, umožňuje zobrazení a přesměrování pomocí X,
- -o pro ukládání do souboru, lze nastavit formát pro automatické číslování snímků,
- -nopreview pro zrušení náhledu.

Pro komunikaci RaspberryPi se statickou deskou používám SPI, kde RaspberryPi je master a STM32 na statické desce je slave. Komunikace pomocí SPI je full-duplex, jde tedy číst data a posílat příkazy zároveň. SPI je řízeno Linux kernelem. Pro jednoduchost použití jsem použil abstrakci SPI, knihovnou wiringPiSPI. Knihovna umožňuje komunikaci přes SPI pomocí inicializace SPI, kde nastavuji kanál, baud rate a mód SPI. Po inicializaci je možné použít funkci pro současný zápis a čtení wiringPiSPIDataRW, které je potřeba zadat kanál, buffer, který se vyšle a následně přepíše přijatými daty a velikost posílaných dat. Jelikož je RaspberryPi SPI master, řídí komunikaci, tudíž musí mít STM32 připravené data k odeslání a musí být připraveno přijímat.

4.3 Statická část

Statická část musí komunikovat s RaspberryPi jako SPI [36] slave, komunikovat s rotační částí pomocí USART [10] v režimu IrDA pro infračervený přenos dat, ovládat motor pomocí řadiče krokových motorů, snímat nulovou polohu pomocí reflexního spínače a generovat hodinový signál pro napájení vysílací cívky.

STM32 má dva buffery pro SPI komunikaci, jeden příchozí a jeden vysílací. Pro samotnou komunikaci používám DMA [37]. DMA je Direct Memory Access, mikrokontrolér STM32-L432KC má 2 DMA řadiče, každý má 7 kanálů. Výhoda DMA spočívá v přenosu dat z periférií do paměti, z paměti do periférií nebo z paměti do paměti bez potřeby mikroprocesorového jádra, protože přenos zajišťuje DMA řadič. Jádro pouze nastartuje požavek pro DMA, po dokončení může zpracovat data. Jádro může čekat blokujícím polling způsobem nebo použít neblokující přerušení. Jelikož je mikrokontrolér SPI slave, musí být připraven na komunikaci s RaspberryPi, které zahajuje komunikaci. Přenášení dat blokujícím způsobem je problematické, protože jádro musí dělat více věcí, které nemůže vykonat, kvůli zbytečnému čekání na SPI mastera. Pokud SPI master začne komunikaci, když je SPI slave zaneprázdněn, může být problém s přenosem dat. Řešením je tedy přerušení, u kterého je jádro zavoláno pro vyřízení komunikace nebo použití DMA, které nezávisle na jádru vyřeší tok dat z/na SPI a paměti. Pro každý přenos pomocí DMA je vytvořený kanál řadiče DMA. Řadič DMA může mít různé priority DMA kanálů. DMA používám k automatickému přenosu dat z periférií do bufferu, který také pomocí DMA odesílám na SPI. Pokud jde o příjem události, místo dat, je lepší použít přerušení.

Pro určení nulové polohy slouží reflexní senzor, který snímá povrch ozubeného kola a spíná při nalezení proužku alobalu. STM32 má nastaveno přerušení na výstupním pinu reflexního spínače [34, 35].

Mikrokontrolér nastaví řadiči krokových motorů adresu na 0 pomocí dvou výstupních digitálních pinů a nastaví pomocí jednotky DAC [38] napětí pro nastavení výkonu motoru. STM32 používá UART pro nastavení frekvence krokování motoru pomocí TMC2209. Pro přenos dat pomocí UART má TMC2209 stanovený datagram, který vypadá následovně 4.2:

UART WRITE ACCESS DATAGRAM STRUCTURE																			
each byte is LSB...MSB, highest byte transmitted first																			
0 ... 63																			
sync + reserved					8 bit slave address			RW + 7 bit register addr.			32 bit data			CRC					
0...7					8...15			16...23			24...55			56...63					
1	0	1	0	Reserved (don't cares but included in CRC)				SLAVEADDR=0..3			register address	1	data bytes 3, 2, 1, 0 (high to low byte)			CRC			
0	1	2	3	4	5	6	7	8	:	15	16	:	23	24	:	55	56	:	63

Obrázek 4.2: UART datagram pro zápis do paměti TMC2209. [46]

První byte slouží k synchronizaci. Druhý byte slouží k identifikaci slave čipu (v mém případě je pouze jeden a to 0). Třetí byte určuje sedmibitovou adresu paměti a RW bit, tedy bit určující čtení nebo zápis na adrese. Další 4 byty slouží pro data a poslední byte pro CRC. Pro výpočet CRC jsem použil funkci ukázanou v datovém listu [46], jedná se o 8-bitový polynomiál.

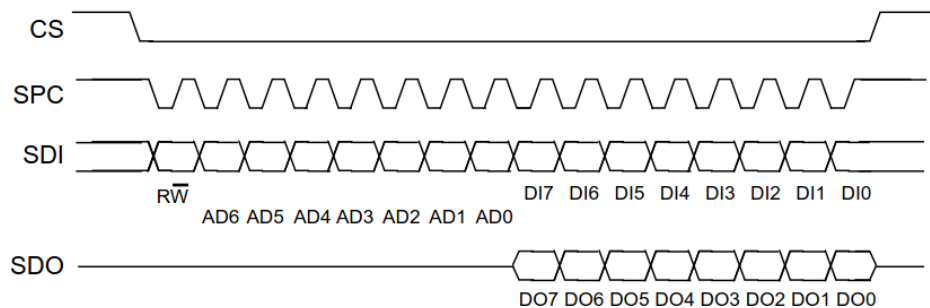
Pro řízení hodinového signálu pro cívku bezdrátového přenosu energie jsem použil časo-
sovač TIM1 kanál 1, který je nastaven pouze při inicializaci a následně pracuje na dané
frekvenci nezávisle.

Pro komunikaci s RaspberryPi používám knihovnu HAL SPI, která umožňuje duplexní
příjem i odesílání pomocí SPI. Lze tak odesílat naměřená data a zároveň přijímat příkazy.
Přenos je řešen pomocí DMA.

Pro komunikaci s rotační částí používám UART v IrDA režimu, pro který je připravená
HAL knihovna. Používám funkce pro příjem pomocí DMA, pokud začne rotační deska
asynchroně vysílat, DMA řadič se postará o příjem dat a uložení přímo do bufferu pro
odeslání na RaspberryPi.

4.4 Rotační část

Mikrokontrolér STM32 komunikuje s IMU ISM330IS pomocí SPI, k programování je využita
knihovna HAL SPI. Pomocí SPI lze zapsat nebo vyčíst hodnoty z paměti IMU. Pro zápis
a čtení má stanoveny protokoly 4.3:



Obrázek 4.3: SPI protokol čtení a zápisu dat IMU. [33]

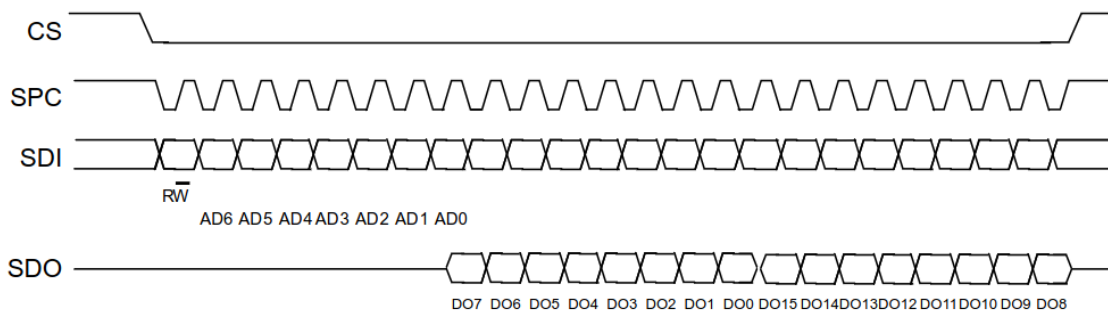
CS (chip select) začíná a ukončuje komunikaci, obaluje správnou komunikaci a řídí
ho SPI master. SPC (serial port clock) řídí SPI master a je to hodinový signál, který
je generován pouze při aktivovaném CS. SDI a SDO jsou datový vstup a výstup. Jejich
hodnoty se mění se sestupnou hranou SPC a čtou se s vzestupnou hranou SPC. Pro čtení
i zápis nejdříve SPI master vyšle 1 byte s požadavkem na SDI, byte se skládá z RW
a sedmi bitové adresy. Dalších 8 bitů je hodnota, která se má zapsat nebo číst. Pokud jde
o zápis následuje na SDI, pokud jde o čtení SPI slave vyšle byte na SDO. Doba platnosti
bitu je mezi dvěma sestupnými hranami SPC. První bit je MSB.

IMU obsahuje dva piny přerušování, které jsou programovatelné přes registry IMU. Při
spuštění jsou jednotky senzorů vypnuty, před čtením měřených hodnot je nejprve nutné
jednotky naprogramovat.

Pro inicializaci IMU je potřeba počkat 10 ms, aby se načetly hodnoty do registrů. Ná-
sledně lze nahrát konfiguraci. Akcelerometr je nastaven registrem CTRL1_XL s rozsahem
+16 g a ODR (Output Data Ready) 6667 Hz. Gyroskop je nastaven registrem CTRL2_G
s rozsahem +2000 dps a ODR 6667Hz.

Hodnoty jednotlivých os gyroskopů a akcelerometrů jsou 16-bitové hodnoty, musí se číst
dva byty, vysoký a nízký byte. SPI je nastaveno na datovou délku 16 bitů, kvůli protokolu,
zajišťuje tak kontinuální hodiny pro 16 bitů. První byte je R/W a adresa registru, druhý

byte je buď data pro zápis nebo je prázdný. SPI protokol lze rozšířit o 8 pulzů pro čtení 16-bitových hodnot naráz, jak lze vidět na obrázku 4.4. Díky umístění senzoru ve středu desky není nutné použít fůzní filtr.



Obrázek 4.4: Rozšířený protokol čtení pro 2 byty. [33]

Pro získání vzdálenosti z dopředného laseru je na desce rezistor, který mění proudovou smyčku na napětí. Napětí měří mikrokontrolér pomocí ADC [39], které je nastaveno pro cyklický převod a cyklické odesílání dat z ADC do bufferu s naměřenými hodnotami pomocí DMA. To zajistí průběžné čtení hodnoty bez potřeby jádra mikrokontroleru. Převod rozsahu napětí závisí na konfiguraci laserového snímače, lze nastavit spodní a vrchní hranici vzdálenosti.

Komunikace s bočním laserovým snímačem, probíhá pomocí RS485, ale mikrokontrolér pracuje s USART. Komunikace s laserovým snímačem je založena na firmwaru předchovího řešení³. Komunikační protokol se skládá z 6 bytového packetu. První byte je startovní znak STX (0x02), následují 3 byty přenášených dat, pátý byte je ukončovací znak ETX (0x03) a poslední byte je výpočet kontrolního kódu BCC, tedy xor tří datových bytů. Pro čtení vzdálenosti je nejdříve vyslán packet (3 bytový příkaz) pro poslání dat, poté snímač vyšle packet s datovými byty vzdálenosti. Snímač může odpovědět i chybou nebo může být špatný kontrolní kód.

Řízení osvětlení povrchu dutiny je řešeno pomocí DAC, pro každý LED pásek zvlášť. Pro nastavení DAC jsem použil knihovny HAL, používá periférii DAC1 s kanály 1 a 2. DAC kanál je nejdříve potřeba nastartovat a poté lze nastavit hodnotu DAC. DAC tvoří napětí pro budiče LED, které určuje intenzitu světla.

Komunikace se statickou částí je obdobná statické části. Používám UART v IrDA režimu, pro který je připravená HAL knihovna. Používám HAL IRDA funkce s DMA pro odesílání zpráv.

4.5 Demonstrační aplikace

Demonstrační aplikace se nachází na RaspberryPi, ke kterému je přístup Ethernetem pomocí SSH, pro připojení je uživatel pi a heslo pi. Pro lepší práci s daty lze použít sshfs, pomocí kterého je možné propojit souborové systémy přes ssh. Aplikace spi-mcu umožňuje zadání příkazu na statickou desku zařízení a čtení dat ze statické desky pomocí SPI. Po spuštění je program ve fázi zadávání příkazů, pro demonstraci jsou dostupné příkazy "timer 0", který vypne timer pro napájení cívky a "timer 1", který naopak timer zapne.

³MOLE <https://strade.fit.vutbr.cz/git/imalanik/BBX-mini>

Po zadání prázdného příkazu přejde aplikace do režimu získávání dat ze zařízení. Data jsou vypsána na terminál, lze je přesměrovat do souboru. Pro získání snímků je vytvořen skript `camera-scan.sh`, který zabaluje nastavení programu `libcamera-still` [27], nastavení snímání lze jednoduše změnit uvnitř skriptu. Skript snímá kamerou po intervalech specifikovaných v parametru `-timelapse` a snímá po dobu danou parametrem `-t` (0 značí nekonečno). Skript ukládá snímky do složky `camera-scan`.

Kapitola 5

Testování a zhodnocení výsledků

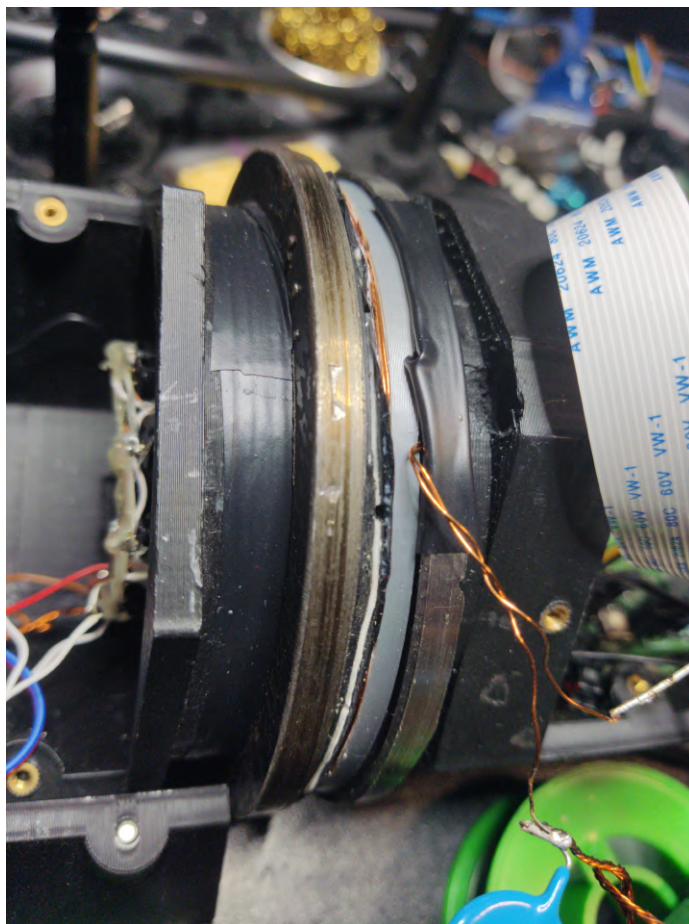
První testování bylo provedeno s originálním spínáním cívky pomocí jednoho tranzistoru na statické desce. První testování dopadlo zkratem na 24 V přes cívku, problém byl v nedosažení správné rezonance mezi cívkou a kondenzátory při spínání jednoho tranzistoru. Jelikož se jednalo o jeden tranzistor, nebylo možné zapojit kondenzátor do série s cívkou, tudíž nebylo možné filtrovat zkratový stejnosměrný proud. Zkrat způsobil výboj na spínacím regulátoru napětí, který propálil desku. Proto jsem se rozhodl vytvořit můstek pro spínání cívky, můstek umožňuje zapojení kondenzátoru do série s cívkou, tím předcházet zkratovým proudům. Nevýhoda můstku je potřeba větší plochy desky.

Druhé testování bylo provedeno s napájením cívky pomocí můstku, nastal problém s nefunkčností mikrokontrolerů, nešly naprogramovat a rotační deska ztratila napětí na 5 V a 3,3 V. Problém byl s velkým rušením způsobeným vyzařováním cívky, které způsobilo špičky vysokého napětí přes 4 V místo 3,3 V. Mikrokontrolér je navržen pro maximální napětí 3,8 V a vysoké napětí nevydržel. Další problém bylo vysoké napětí akumulované z cívky, spínací regulátor napětí pro 5 V je navržen pro maximálně 28 V, napětí vystoupalo přes 32 V a tudíž poškodilo spínací regulátor napětí. Proto jsem se pokusil snížit rušení.

Techniky stínění elektromagnetického záření lze rozdělit na pasivní a aktivní. Pasivní stínění používá dva druhy [40, 2, 6]. První druh jsou vodivé materiály, které při průchodu elektromagnetického záření generují vířivé proudy (Eddy current), které proudí na opačnou stranu než vysílací cívka, a tak indukují protichůdné magnetické pole. Druhý druh je použití vysoce permeabilních, tedy vysoce magnetických materiálů, jako jsou ferity. Vysoce permeabilní materiály usměrňují magnetický tok. Použití vodivých materiálů a generace vířivých proudů produkuje výrazné přenosové ztráty. Použití vysoce permeabilních materiálů s nízkými ztrátami může zvýšit efektivitu přenosu. Proto mají feritové štíty vysokou efektivitu přenosu a stínění.

Aktivní stínění funguje na principu vytvoření další cívky, která generuje opačné elektromagnetické pole, tím potlačuje vyzařování. Pro správnou funkci musí být pečlivě spočítána amplituda a fáze proudu. Cívky stínění mohou být napájeny externě nebo mohou používat rezonanci a energii z vysílacích cívek. Pro stínění lze použít kombinaci zmíněných technik.

Vyrobil jsem dva stínící kroužky z pásovinu 6x60 oceli S235JRG2 dle EN10025. Dvě pásovinu jsem svařil, aby byly široké 120 mm, a následně vysoustružil na soustruhu TOS S-45 na vnitřní průměr 90 mm a vnější 108 mm. Vysoustružil jsem drážku pro cívku do obou kroužků, ocel pak více obklopuje cívku. Ocel jsem polepil izolační páskou a následně oboustrannou lepicí páskou, na kterou jsem namotal cívku o 10 závitů. Ačkoliv se rušení snížilo, byla snížena efektivita přenosu energie a ocelové kroužky byly velmi zahřáté prouděním vířivých proudů. Nakonec jsem přidal mezi stínící ocelový kroužek a cívku plastový



Obrázek 5.1: Cívky pro přenos napájení obklopeny ocelovými kroužky pro stínění.

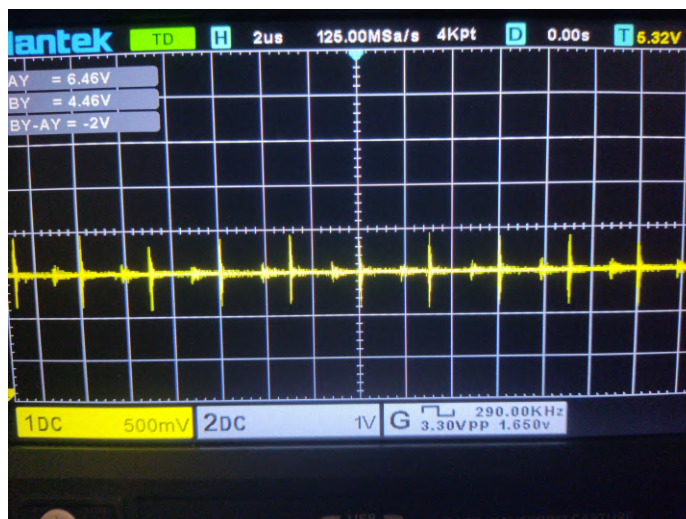
kroužek, tím jsem zlepšil efektivitu přenosu za menší úroveň tlumení elektromagnetického záření. Rušení se lehce snížilo zkroucením kabelů cívky a uzemněním rotační desky ke statické desce přes ložisko. Při ladění přenosu energie přes cívky jsem skončil u konfigurace se seriově zapojeným 470 nF kondenzátorem a na vysílací cívce paralelně s cívkou 50 nF kondenzátorem. Přenos energie přes cívky spolehlivě napájí rotační část, hlavně laserové snímače a LED pásy.

Výsledný šum napětí je menší, ale stále nedostačující, na obrázku 5.2 je 5 V napájení na rotační desce při spuštěném napájení přes cívku.

Na obrázku 5.3 lze vidět přijímaný signál IrDA rx, bez rušení generovaném cívkou a na obrázku 5.4 lze vidět IrDA signál zasuměný cívkou, který přijímá mikrokontrolér na statické desce. Při zaplém napájení přes cívky je generováno rušení na IrDA přijímači, mikrokontrolér čte samé 1, tudíž nelze pracovat zároveň s cívkou a přenosem dat pomocí IrDA.

Na obrázcích 5.5 a 5.6 lze vidět rušení cívek na obraz z kamery, při silném rušení hlásí program chybu komunikace a není možné zahájit snímání kamerou. Na obrázku 5.7 je obraz z kamery s výplými cívkami, obraz je hodně tmavý, kvůli vypnutým světlům.

Kvalita dat je špatná kvůli rušení cívky. Rušení znemožňuje přenos dat mezi rotační a statickou částí zařízení, znemožňuje komunikaci s kamerou a ruší hladiny stejnosměrného napětí. Bez napájení cívky jsou snímky kamery velmi tmavé, hloubková data nejsou přená-



Obrázek 5.2: Napájecí napětí 5V na rotační desce při rušení z cívky.

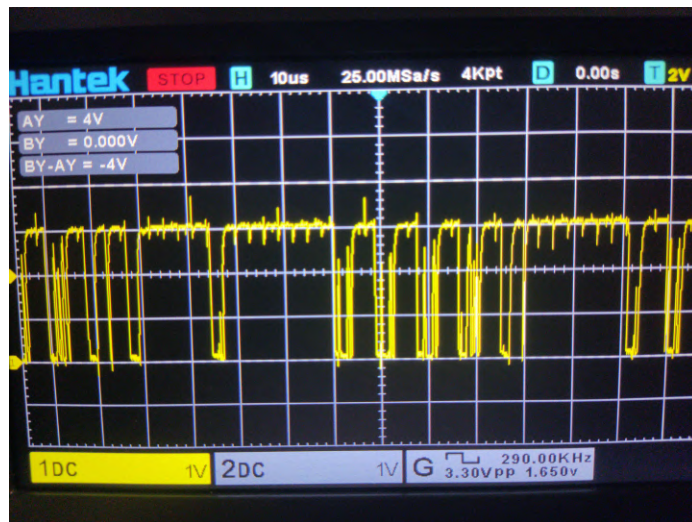


Obrázek 5.3: Přijímaný signál po zesílení z infračerveného přijímače na statické desce bez rušení z cívky.

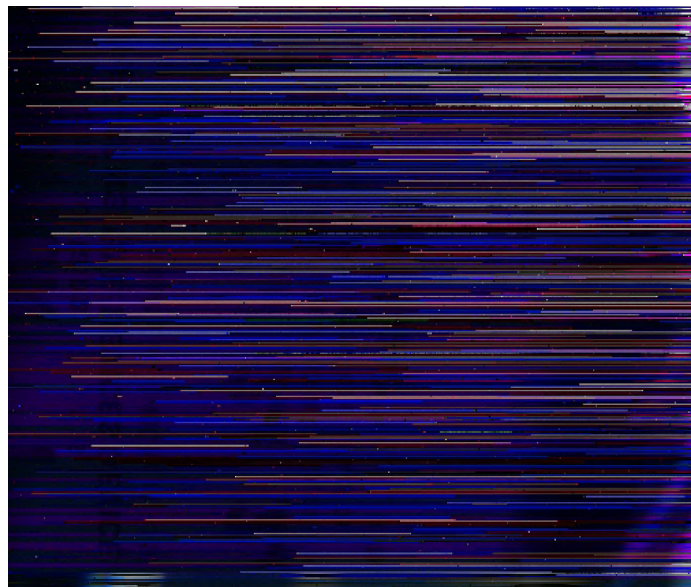
šena. Rychlost snímání ovlivňuje nejvíce paměť, do které se ukládají snímky, ukládání na SD kartu zabere přibližně 2,5 s. Kamera je zaostřena na vzdálenost pro dutinu průměru 120 mm. Všechny senzory měří dobře nebýt rušení cívky.

Řešením je limitace rušení oddělením výkonových střídavých proudů kolem cívek. Oddělit usměrňovací část statické desky, umístit desku napájení cívky a desku s usměrněním blízko cívek a jejich odstínění pomocí vysoce permeabilních materiálů jako ferit nebo transformátorová ocel. Jednodušší možností je použití kartáčů místo cívek, což vede k ne plně bezkontaktnímu přenosu energie a opotřebení kartáčů.

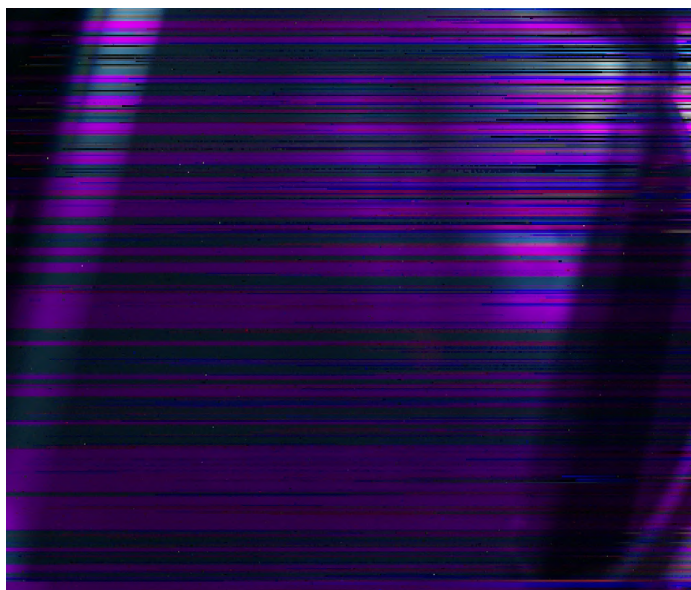
Předělání zařízení pro limitaci šumu cívky je časově a finančně náročné. Už nezbyval čas na předělání celého zařízení.



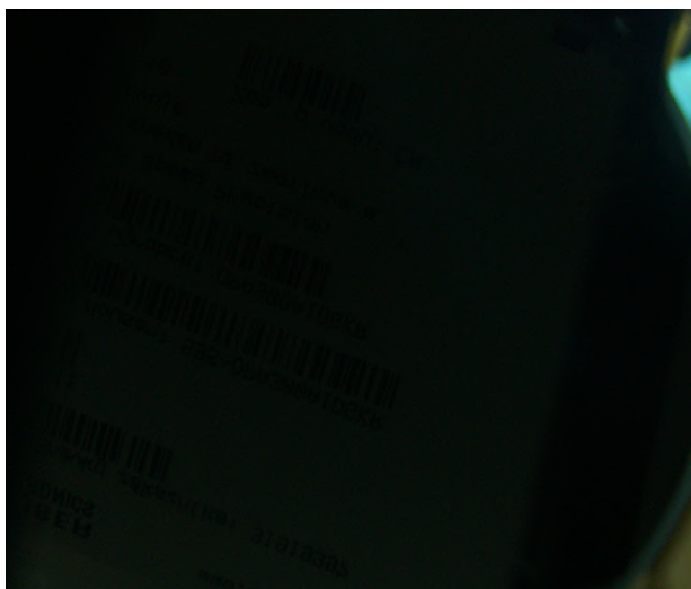
Obrázek 5.4: Přijímaný signál po zesílení z infračerveného přijímače na statické desce s rušením z cívky.



Obrázek 5.5: Rušení přenosu obrazu z kamery při zaplé cívce.



Obrázek 5.6: Rušení přenosu obrazu z kamery při zaplé cívce. Někdy jde vidět původní obraz.



Obrázek 5.7: Obraz kamery s vyplou cívkou, problém je nedostatek světla, kvůli výplým LED.

Kapitola 6

Závěr

Cílem této práce bylo seznámit se se zařízením pro snímání povrchu, nastudovat potřebnou teorii o možnostech bezdrátové komunikace, bezdrátového napájení, ovládání krokových motorů a senzorů pro měření vzdálenosti, navrhnout zařízení s bezdrátovou rotační hlavou a zařízení realizovat a připravit demonstrační aplikaci, která dokáže řídit rotační hlavu a zobrazovat data. Nakonec nasnímat povrchy a zhodnotit získaná data, se zaměřením na kvalitu získaných dat.

Úspěšně jsem se seznámil se zařízením pro skenování povrchu dutin, nastudoval požadovanou teorii, vytvořil teoretický přehled a vytvořil jsem návrh zařízení mechanického modelu, desek plošných spojů a vybral komponenty. Vytiskl jsem mechanické části zařízení pomocí 3D tisku, napájel jsem součástky na desky plošných spojů, soustružil jsem ocelové stínící kroužky, namotal jsem vlastní cívky, vytvořil infračervený vysílač a přijímač a naprogramoval jsem zařízení, které umí komunikovat a sbírat data. Testoval jsem zařízení, napájení rotační části pomocí bezdrátového přenosu energie funguje spolehlivě, ale vyskytl se problémem s elektromagnetickým rušením z napájecí cívky. Představil jsem jak lze problém s elektromagnetickým rušením řešit. Dokázal jsem, že je možné sestavit zařízení s rotační hlavou pro skenování dutin hlavní, akorát je potřeba vyřešit problém s rušením z cívek.

Práce mě prohloubila znalosti v mnoha oblastech, ať už o senzorech, fyzikálních jevech, elektronice, mechanice, vestavěných systémech, tím jsem se naučil více možností k řešení problémů.

Do budoucna je potřeba vyřešit rušení z cívek, které jsem z časových a finančních důvodů nestihl implementovat. Problém lze řešit rozdělením částí bezdrátového napájení od zbytku zařízení a jejich izolace pomocí vysoko permeabilních materiálů, popřípadě použitím aktivního stínění. S možnými metodami potlačení rušení od bezdrátového napájení je potřeba experimentovat a zjistit jejich účinnost pro finální produkt. Po odstínění lze produkt zkompletovat a nasadit v praxi.

Literatura

- [1] *IrDA Specifications* [online]. IRDA.org, 2023 [cit. 2023-01-18]. Dostupné z: <https://www.irda.org/standards/specifications>.
- [2] AHIRE, D., GOND, V. J. a CHOPADE, J. J. Coil material and magnetic shielding methods for efficient wireless power transfer system for biomedical implant application. *Biosensors and Bioelectronics: X*. 2022, sv. 10, s. 100123, [cit. 2024-04-21]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosx.2022.100123>. ISSN 2590-1370. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590137022000188>.
- [3] AMANN, M.-C., BOSCH, T., LESCURE, M., MYLLYLÄ, R. a RIOUX, M. Laser ranging: a critical review of usual techniques for distance measurement. *Optical Engineering*. 2001, sv. 40, s. 10–19.
- [4] ARDUCAM. *Arducam 4-12mm Varifocal C-Mount Lens for Raspberry Pi HQ Camera, with C-CS Adapter* [online]. 2024 [cit. 2024-04-28]. Dostupné z: <https://www.arducam.com/product/arducam-4-12mm-varifocal-c-mount-lens-for-raspberry-pi-hq-camera-with-c-cs-adapter/>.
- [5] BAKER, D. 2 phase hybrid stepping motors. In: *IEE Colloquium on Stepper Motors and Their Control*. 1994, s. 2/1–2/3.
- [6] DIGHRASKER, M. a SMITH, N. *EE POWER: Conducted EMI Reduction Techniques for Wireless Power Systems* [online], 14. prosince 2023. Revidováno 14. 12. 2023 [cit. 2024-04-21]. Dostupné z: <https://eepower.com/technical-articles/power-management-conducted-emi-reduction-techniques-for-wireless-power-systems/#>.
- [7] DIODES INCORPORATED. *RTT410: 4A SURFACE MOUNT FAST GLASS PASSIVATED BRIDGE RECTIFIER* [online]. Datový list, Rev. 4 - 2. Diodes Incorporated, říjen 2021 [cit. 2024-04-25]. Dostupné z: <https://www.diodes.com/assets/Datasheets/RTT410.pdf>.
- [8] DIODES INCORPORATED. *AL8861: 40V 1.5A BUCK LED DRIVER* [online]. Datový list, Rev. 5 - 2. Diodes Incorporated, září 2022 [cit. 2024-04-25]. Dostupné z: <https://www.diodes.com/assets/Datasheets/AL8861.pdf>.
- [9] FONSECA, J., BAPTISTA, A., MARTINS, M. a TORRES, J. P. Distance Measurement Systems Using Lasers and Their Applications. *Applied Physics Research*. Červenec 2017, sv. 9, s. 33. DOI: 10.5539/apr.v9n4p33.
- [10] GUPTA, A. K., RAMAN, A., KUMAR, N. a RANJAN, R. Design and Implementation of High-Speed Universal Asynchronous Receiver and Transmitter (UART). In: *2020 7th*

International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN). 2020, s. 295–300. DOI: 10.1109/SPIN48934.2020.9070856.

- [11] HASHEMNIA, N. a ASAEI, B. Comparative study of using different electric motors in the electric vehicles. In: *2008 18th International Conference on Electrical Machines*. 2008, s. 1–5. DOI: 10.1109/ICELMACH.2008.4800157.
- [12] KANKAN WANG AND HAO LIU. *RS-485 Basics Series* [online]. Bílá kniha, 1. vyd. Texas Instruments Incorporated, únor 2021 [cit. 2024-04-25]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/wp/s11a545/s11a545.pdf>.
- [13] LAI, C.-K., CIOU, J.-S. a TSAI, C.-C. FPGA-based stepper motor vector control system design. In: *2017 International Automatic Control Conference (CACCS)*. 2017, s. 1–5. DOI: 10.1109/CACCS.2017.8284269.
- [14] LASKAKIT. *Krokový motor NEMA 17 17HS8401 0,5Nm* [online]. 2024 [cit. 2024-04-28]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/krokovy-motor-nema-17-17hs8401-0-5nm/>.
- [15] LI, H., WANG, C., LIU, Y. a YUE, R. Research on Single-Switch Wireless Power Transfer System Based on SiC MOSFET. *IEEE Access*. 2019, sv. 7, s. 163796–163805. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2952463.
- [16] LI, X., TSUI, C.-Y. a KI, W.-H. A 13.56 MHz Wireless Power Transfer System With Reconfigurable Resonant Regulating Rectifier and Wireless Power Control for Implantable Medical Devices. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. 2015, sv. 50, č. 4, s. 978–989. DOI: 10.1109/JSSC.2014.2387832.
- [17] LIU, Z., TAO, C., WANG, L., ZHANG, Y. a LI, F. A Research on Characteristics of Wireless Power Transfer System Based on LCC/N Magnetic Integration Compensation Circuit. In: *2021 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW)*. 2021, s. 1–5. DOI: 10.1109/WoW51332.2021.9462887.
- [18] LU, X., WANG, P., NIYATO, D., KIM, D. I. a HAN, Z. Wireless Charging Technologies: Fundamentals, Standards, and Network Applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2016, sv. 18, č. 2, s. 1413–1452. DOI: 10.1109/COMST.2015.2499783.
- [19] MAXIM INTEGRATED PRODUCTS. *MAX3130/MAX3131: 3V to 5.5V, IrDA Infrared Transceiver with Integrated RS-232 Interface* [online]. Datový list, Rev. 0. Maxim Integrated Products, listopad 1998 [cit. 2024-04-25]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/MAX3130-MAX3131.pdf>.
- [20] MAXIM INTEGRATED PRODUCTS. *MAX13430E-MAX13433E: RS-485 Transceivers with Low-Voltage Logic Interface* [online]. Datový list, Rev. 2. Maxim Integrated Products, květen 2010 [cit. 2024-04-25]. Dostupné z: https://cz.mouser.com/datasheet/2/609/MAX13430E_MAX13433E-3126794.pdf.
- [21] MICROCHIP TECHNOLOGY INC. . *MCP14A0901/2: 9.0A MOSFET Driver with Low Threshold Input and Enable* [online]. Datový list, Rev. C. Microchip Technology Inc.,

- březen 2019, Revidováno 04 2023 [cit. 2024-05-02]. Dostupné z:
<https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/APID/ProductDocuments/DataSheets/MCP14A0901-2-9.0A-MOSFET-Driver-with-Low-Threshold-Input-and-Enable-Data-Sheet-DS20006183.pdf>.
- [22] MICROCHIP TECHNOLOGY INC.. *MCP1826/MCP1826S: 1000 mA, Low-Voltage, Low Quiescent Current LDO Regulator* [online]. Datový list, Rev. C. Microchip Technology Inc., srpen 2007, Revidováno 05 2021 [cit. 2024-05-02]. Dostupné z:
<https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/APID/ProductDocuments/DataSheets/MCP1826-MCP1826S-1000-mA%2C-Low-Voltage%2C-Low-Quiescent-Current-LDO-Regulator-20002057C.pdf>.
- [23] MINNAERT, B. a STEVENS, N. Maximizing the Power Transfer for a Mixed Inductive and Capacitive Wireless Power Transfer System. In: *2018 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC)*. 2018, s. 1–4. DOI: 10.1109/WPT.2018.8639265.
- [24] NEXPERIA B.V.. *74LVC1G14-Q100: Single Schmitt trigger inverter* [online]. Datový list, Rev. 6. Nexperia B.V., červenec 2012, Revidováno 05 2021 [cit. 2024-04-25]. Dostupné z: https://cz.mouser.com/datasheet/2/916/74LVC1G14_Q100-1535646.pdf.
- [25] PRODANOV, P. a DANKOV, D. Reliability of low-power stepper motor drivers. In: *2022 XXXI International Scientific Conference Electronics (ET)*. 2022, s. 1–5. DOI: 10.1109/ET55967.2022.9920214.
- [26] RASPBERRY PI LTD. *Camera* [online]. 2024 [cit. 2024-04-28]. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.com/documentation/accessories/camera.html>.
- [27] RASPBERRY PI LTD. *Camera software* [online]. 2024 [cit. 2024-04-28]. Dostupné z: https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/camera_software.html.
- [28] SCARPINO, M. *Motors for Makers: A Guide to Steppers, Servos, and other Electrical Machines*. Que, 2015. ISBN 9780134032832.
- [29] SEETHARAMAN, R., MENAKA, A. a ANANDAN, K. Design of Infrared Audio Transmitter and Receiver for point to point data transmission. In: *2022 IEEE International Conference on Nanoelectronics, Nanophotonics, Nanomaterials, Nanobioscience & Nanotechnology (5NANO)*. 2022, s. 1–4. DOI: 10.1109/5NANO53044.2022.9828961.
- [30] SICK. *DT50-N2113 / Dx50: SNÍMAČE MĚŘENÍ VZDÁLENOSTI - STŘEDNÍ DOSAHY* [online]. Datový list, 1. vyd. Hamburk: SICK AG, listopad 2023, revidováno 16. 11. 2023 [cit. 2024-04-02]. Dostupné z: https://cdn.sick.com/media/pdf/4/74/274/dataSheet_DT50-N2113_1047398_cs.pdf.
- [31] SICK. *OD1-B100C50A15 / OD Mini: SENZORY PRO MĚŘENÍ VZDÁLENOSTI* [online]. Datový list, 1. vyd. SICK AG, listopad 2023, revidováno 16. 11. 2023 [cit. 2024-04-02]. Dostupné z: https://cdn.sick.com/media/pdf/7/57/657/dataSheet_OD1-B100C50A15_6054087_cs.pdf.
- [32] SRISKANTHAN, N., LIM, S. a SUBRAMANIAN, K. PIM-ASCII100 digital data encoding scheme for short distance wireless infrared transmission. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*. 1998, sv. 44, č. 2, s. 261–267. DOI: 10.1109/30.681936.

- [33] STMICROELECTRONICS. *ISM330IS: 6-axis IMU: always-on 3-axis accelerometer and 3-axis gyroscope with ISPU - intelligent sensor processing unit* [online]. Datový list, Rev. 2. STMicroelectronics, srpen 2023 [cit. 2024-04-25]. Dostupné z: <https://www.st.com/en/mems-and-sensors/ism330is.html>.
- [34] STMICROELECTRONICS a PŘÍSPĚVATELÉ. *Wiki by ST: Getting started with GPIO* [online], 7. května 2020. Revidováno 26. 12. 2022 [cit. 2024-04-21]. Dostupné z: https://wiki.st.com/stm32mcu/wiki/Getting_started_with_GPIO.
- [35] STMICROELECTRONICS a PŘÍSPĚVATELÉ. *Wiki by ST: Getting started with EXTI* [online], 1. července 2020. Revidováno 5. 1. 2023 [cit. 2024-04-21]. Dostupné z: https://wiki.st.com/stm32mcu/wiki/Getting_started_with_EXTI.
- [36] STMICROELECTRONICS a PŘÍSPĚVATELÉ. *Wiki by ST: Getting started with SPI* [online], 2. listopadu 2022. Revidováno 12. 4. 2024 [cit. 2024-04-21]. Dostupné z: https://wiki.st.com/stm32mcu/wiki/Getting_started_with_SPI.
- [37] STMICROELECTRONICS a PŘÍSPĚVATELÉ. *Wiki by ST: Getting started with DMA* [online], 11. října 2022. Revidováno 13. 2. 2023 [cit. 2024-04-21]. Dostupné z: https://wiki.st.com/stm32mcu/wiki/Getting_started_with_DMA.
- [38] STMICROELECTRONICS a PŘÍSPĚVATELÉ. *Wiki by ST: Getting started with DAC* [online], 17. října 2022. Revidováno 5. 1. 2023 [cit. 2024-04-21]. Dostupné z: https://wiki.st.com/stm32mcu/wiki/Getting_started_with_DAC.
- [39] STMICROELECTRONICS a PŘÍSPĚVATELÉ. *Wiki by ST: Getting started with ADC* [online], 17. října 2022. Revidováno 13. 2. 2023 [cit. 2024-04-21]. Dostupné z: https://wiki.st.com/stm32mcu/wiki/Getting_started_with_ADC.
- [40] TAN, L., ELNAIL, K. E. I., JU, M. a HUANG, X. Comparative Analysis and Design of the Shielding Techniques in WPT Systems for Charging EVs. *Energies*. 2019, sv. 12, č. 11, [cit. 2024-04-21]. DOI: 10.3390/en12112115. ISSN 1996-1073. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/11/2115>.
- [41] TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED. *LM2940-N, LM2940C: LM2940x 1-A Low Dropout Regulator* [online]. Datový list. Texas Instruments Incorporated, březen 2000, Revidováno 12 2014 [cit. 2024-04-25]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2940-n.pdf>.
- [42] TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED. *OPA380/OPA2380: Precision, High-Speed Transimpedance Amplifier* [online]. Datový list. Texas Instruments Incorporated, listopad 2003, Revidováno 09 2007 [cit. 2024-04-25]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa380.pdf>.
- [43] TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED. *TPS54335-2A: 4.5-V to 28-V Input, 3-A Output, Synchronous Step-Down DC-DC Converter* [online]. Datový list. Texas Instruments Incorporated, červenec 2016 [cit. 2024-04-25]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps54335-2a.pdf>.
- [44] TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED. *LM5108: Robust and Compact 100-V Half-Bridge Gate Driver* [online]. Datový list. Texas Instruments Incorporated, květen 2019, Revidováno 07 2023 [cit. 2024-04-25]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm5108.pdf>.

- [45] TOSHIBA ELECTRONIC DEVICES & STORAGE CORPORATION. *SSM3K122TU: TOSHIBA Field Effect Transistor, Silicon N-Channel MOS Type* [online]. Datový list. Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation, červen 2020 [cit. 2024-04-25]. Dostupné z: https://cz.mouser.com/datasheet/2/408/SSM3K122TU_datasheet_en_20200622-1627267.pdf.
- [46] TRINAMIC MOTION CONTROL GMBH & CO. KG. *TMC2209 Datasheet: POWER DRIVER FOR STEPPER MOTORS* [online]. Datový list, Rev. 1.08. TRINAMIC Motion Control GmbH & Co. KG, květen 2022, revidováno 25. 5. 2022 [cit. 2024-04-02]. Dostupné z: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/TMC2209_datasheet_rev1.08.pdf.
- [47] VISHAY INTERTECHNOLOGY, INC.. *BPV10NF: Silicon PIN Photodiode* [online]. Datový list, Rev. 2.1. VISHAY INTERTECHNOLOGY, INC., červenec 2021 [cit. 2024-04-25]. Dostupné z: <https://www.vishay.com/docs/81503/bpv10nf.pdf>.
- [48] VISHAY INTERTECHNOLOGY, INC.. *TCRT1000, TCRT1010: Reflective Optical Sensor With Transistor Output* [online]. Datový list, Rev. 2.0. VISHAY INTERTECHNOLOGY, INC., říjen 2021 [cit. 2024-04-25]. Dostupné z: <https://www.vishay.com/docs/83752/tcrt1000.pdf>.
- [49] VISHAY INTERTECHNOLOGY, INC.. *SiSS32ADN: N-Channel 80 V (D-S) MOSFET* [online]. Datový list, Rev. B. VISHAY INTERTECHNOLOGY, INC., květen 2022 [cit. 2024-04-25]. Dostupné z: <https://www.vishay.com/docs/77851/siss32adn.pdf>.
- [50] VISHAY INTERTECHNOLOGY, INC.. *TSFF5410: High Speed Infrared Emitting Diode, 870 nm, GaAlAs Double Hetero* [online]. Datový list, Rev. 1.9. VISHAY INTERTECHNOLOGY, INC., listopad 2023 [cit. 2024-04-25]. Dostupné z: <https://www.vishay.com/docs/81091/tsff5410.pdf>.
- [51] YU, J., WANG, Y., KANG, H. a LU, G. A control system of three-axis stepper motor based on the FPGA. In: *Proceedings 2013 International Conference on Mechatronic Sciences, Electric Engineering and Computer (MEC)*. 2013, s. 3334–3337. DOI: 10.1109/MEC.2013.6885593.
- [52] ZHANG, X. a PAN, H. Design of a two-phase stepper motor drive controller for 6000m deep-sea electric Pan&Tilt. In: *2021 International Conference on Artificial Intelligence and Electromechanical Automation (AIEA)*. 2021, s. 148–151. DOI: 10.1109/AIEA53260.2021.00039.
- [53] ZHANG, Y., WANG, C. a XING, T. An Optical Distance Measuring Method Using Non-Contact Technology. In: *2010 WASE International Conference on Information Engineering*. 2010, sv. 3, s. 30–33. DOI: 10.1109/ICIE.2010.187.
- [54] ZURAWSKI, R. *Embedded systems handbook, second edition: Networked embedded systems*. CRC Press, 2009. ISBN 9781439807613.