

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2022

Bc. Eliška Novotná



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ

DEPARTMENT OF BIOMEDICAL ENGINEERING

ŘÍZENÍ LINEÁRNÍHO POHONU DETEKČÍ POHYBU OBJEKTU

LINEAR DRIVE CONTROL BASED ON OBJECT MOTION DETECTION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Eliška Novotná

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Sekora

BRNO 2022

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Bioinženýrství**

Ústav biomedicínského inženýrství

Studentka: Bc. Eliška Novotná

ID: 203680

Ročník: 2

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Řízení lineárního pohonu detekcí pohybu objektu

POKyny PRO VYPRACOVÁNÍ:

1) Prostudujte konstrukce lineárních pohonů a možnosti bezkontaktního měření vzdálenosti. Zaměřte se na detekci vzdálenosti ultrazvukem. Proveďte literární rešerši v dané oblasti. 2) Proveďte systémový návrh zařízení, které bude sledovat objekt a udržovat konstantní vzdálenost mezi objektem a zařízením polohou lineárního motoru. Pohyb sledovaného objektu předpokládejte pouze v jedné ose, rovnoběžné s trajektorií motoru. 3) Proveďte 3D návrh nosného vozíku, který bude řízen lineárním pohonem. V rámci konstrukce předpokládejte možné stropní zavěšení celého systému. 4) Systém bude umožňovat sledování objektu do maximální rychlosti 1,5 m/s. 5) Realizujte navržené zařízení a otestujte funkčnost návrhu v laboratoři. 6) Dosažené výsledky diskutujte a vyhodnoťte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] DAVID, A. Direct Drive Linear Motors: Overview and Selection Process. ZABER [online]. August 10, 2018. Dostupné z: https://www.zaber.com/articles/direct_drive_linear-motors.pdf

[2] CARULLO, A. a M. PARVIS. An ultrasonic sensor for distance measurement in automotive applications. IEEE Sensors Journal [online]. 2001, 1(2). ISSN 1530-437X. Dostupné z: doi:10.1109/JSEN.2001.936931

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 20.5.2022

Vedoucí práce: Ing. Jiří Sekora

Konzultant: doc. Ing. Milan Klapka, Ph.D.

doc. Ing. Radim Kolář, Ph.D.

předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Diplomová práce se věnuje detekci pohybu a řízení lineárního pohonu. Práce je rozdělena na část teoretickou, kde je především popsána a vysvětlena část ultrazvukových senzorů a lineárních pohonů včetně typů jednotlivých lineárních pohonů. V praktické části je uvedeno samotné řešení, jak po hardwarové stránce tak i po stránce softwarové. Tato část tedy obsahuje systémový návrh společně s vývojovými diagramy a zjednodušeným 3D návrhem konstrukce na konci práce je poté uvedena ukázka finální konstrukce.

KLÍČOVÁ SLOVA

Lineární pohon, krokový motor, ultrazvuk, ultrazvukový senzor, detekce pohybu

ABSTRACT

The diploma thesis deals with motion detection and linear drive control. The diploma thesis is divided into a theoretical part, where the part of ultrasonic sensors and linear actuators, including the types of individual linear actuators, is mainly described and explained. The practical part presents the solution itself, both in terms of hardware and software. This part therefore contains the system design together with the flowcharts and the simplified 3D design of the structure. At the end of the work is given a sample of the final structure.

KEYWORDS

Linear motor, stepper motor, ultrasound, ultrasonic sensor, motion detection

NOVOTNÁ, Eliška. *Řízení lineárního pohonu detekcí pohybu objektu*. Brno, 2022, 64 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav biomedicínského inženýrství. Vedoucí práce: Ing. Jiří Sekora

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Řízení lineárního pohonu detekcí pohybu objektu“ jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autorka uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědoma následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autorky

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala vedoucímu diplomové práce panu Ing. Jiřímu Sekorovi za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	11
1 Ultrazvukové senzory	12
1.1 Ultrazvuk	12
1.2 Druhy ultrazvukového vlnění	12
1.3 Rychlost šíření ultrazvuku	13
1.4 Zdroje ultrazvuku	14
1.4.1 Piezoelektrické měniče	14
1.4.2 Magnetostrikční měniče	15
1.5 Ultrazvukové senzory	16
1.6 Základní parametry ultrazvukových sensorů	19
2 Jiné způsoby bezkontaktního měření vzdálenosti	21
2.1 Optické senzory pro měření vzdálenosti	21
2.2 Indukční senzory pro měření vzdálenosti	21
2.3 Kapacitní senzory pro měření vzdálenosti	21
2.4 Určení vzdálenosti pomocí rádiových vln	22
3 Lineární motor	23
3.1 Princip a konstrukce	23
3.2 Výhody a nevýhody lineárních motorů	25
3.3 Typy lineárních motorů	25
3.4 Synchronní motor	26
3.4.1 Se železným jádrem	27
3.4.2 Bez železného jádra	27
3.4.3 Trubkové	28
3.4.4 Bezdrážkové	29
3.5 Asynchronní motory	29
4 Krokové motory	30
4.1 Princip pohybu	30
4.2 Výhody a nevýhody krokových motorů	31
4.3 Režimy krokových motorů	31
4.3.1 Práce v režimu celého kroku	31
4.3.2 Práce v režimu půlkroku	31
4.3.3 Práce v režimu mikrokroku	32
4.4 Metody řízení krokových motorů	32
4.4.1 Unipolární řízení	33

4.4.2	Bipolární řízení	33
4.5	Typy krokových motorů	34
4.5.1	Krokový motor s trvalým magnetem	34
4.5.2	Krokové motory s proměnlivou reluktancí	34
4.5.3	Hybridní krokový motor	35
5	Návrh řešení	36
5.1	Blokové schéma	37
5.2	Návrh konstrukce	38
5.3	Volba komponent	40
5.3.1	Řídící jednotka	40
5.3.2	Ultrazvukový senzor	40
5.3.3	Pohon	41
5.3.4	Ukončující tlačítko	42
5.3.5	LED	42
5.3.6	Optická závora	42
5.4	Software	44
5.5	Konstrukce	54
6	Diskuze	56
	Závěr	59
	Literatura	60

Seznam obrázků

1.1	Rozdělení ultrazvuku podle frekvence	12
1.2	Podélné ultrazvukové vlnění	13
1.3	Příčné ultrazvukové vlnění	13
1.4	Přímý piezoelektrický jev (a) a nepřímý piezoelektrický jev (b)	15
1.5	Princip magnetostrikce, kde N znázorňuje severní pól magnetu a S jižní pól magnetu	16
1.6	Ukázka časového průběhu a vysílání signálu z ultrazvukového senzoru,	17
1.7	Princip detekce vysláním signálu a detekcí odražené odezvy.	18
1.8	Základní parametry ultrazvukových senzorů.	19
2.1	Princip určení vzdálenosti pomocí rádiových vln, na levé straně je zobrazen pulzní radar a na pravé straně je zobrazen radar s kontinuální vlnou.	22
3.1	Porovnání rotačních motorů a lineárních motorů.	23
3.2	Ukázka lineárního motoru a jeho konstrukčních komponent.	24
3.3	Lineární motor se železným jádrem.	27
3.4	Lineární motor bez železného jádra.	28
3.5	Trubkový lineární motor.	28
3.6	Lineární asynchronní motor.	29
4.1	Krokový motor (vlevo), stator krokového motoru (uprostřed), rotor s hřídelí (vpravo)	30
4.2	Princip funkce motoru v režimu celého kroku při dvoufázovém napájení.	32
4.3	Princip funkce motoru v režimu půlkroku při dvoufázovém napájení.	32
4.4	Schéma zapojení unipolárního řízení.	33
4.5	Schéma zapojení bipolárního řízení, které je na první pohled složitější od unipolárního.	33
4.6	Krokový motor s trvalým magnetem.	34
4.7	Krokový motor s proměnlivou reluktancí.	34
4.8	Hybridní krokový motor.	35
5.1	Návrh konstrukce závěsného schématu	36
5.2	Návrh konstrukce pro variantu na zemi	36
5.3	Blokové schéma navrženého systému	37
5.4	Zjednodušený 3D návrh pozemní konstrukce z vícero úhlů	38
5.5	Zjednodušený 3D návrh stropní konstrukce z vícero úhlů	39
5.6	Vývojová deska STM32 Nucleo	40
5.7	Modul ultrazvukového senzoru HC-SR04 (vlevo) a jeho časový průběh vysílání a přijímání impulzů (vpravo)	41

5.8	Krokový motor 28BYJ-48, na levé straně je schéma zapojení jednotlivých cívek a napájení, kde jsou pod čísly 1-4 jednotlivé cívky a číslo 5 značí napájení, a na pravé straně jsou zobrazeny převody.	41
5.9	Konstrukce řemenu: 1. Zuby z polyuretanu 2. Ocelová tažná vlákna 3. Hřeben z polyuretanu.	42
5.10	Schéma zapojení optické závory	43
5.11	Celkové schéma zapojení na nepájivém poli k vývojové desce STM32. V horní části se nacházejí optická závora, která značí začátek dráhy. LED signalizace a ve spodní části zapojení pull-up rezistoru a optické závory, na konci dráhy.	43
5.12	Inicializační podmínka č. 1	44
5.13	Inicializační podmínka č. 2	44
5.14	Inicializační podmínka č. 3	44
5.15	Obecný vývojový diagram, který volá dvě funkce: Detekci osoby a zachování vzdálenosti	45
5.16	Vývojový diagram detekce objektu, posun v ose y není součástí zadání, je zde brán pouze teoreticky	46
5.17	Vývojový diagram zachování vzdálenosti	47
5.18	Primární hardwarová podmínka optické závory	48
5.19	Zjednodušeně naznačený průběh detekce pohybu	49
5.20	Nastavení a přejmenování jednotlivých pinů v programu STM32CubeIDE	50
5.21	Zapojení jednotlivých pinů komponent na piny na vývojové desce STM32F303RE	51
5.22	Vývojový diagram pro ošetření mimořádně chybné hodnoty vzdálenosti	52
5.23	Finální konstrukce pro ověření funkčnosti, přiblížený pohled shora	54
5.24	Finální konstrukce pro ověření funkčnosti, přiblížený pohled zepředu	55

Seznam tabulek

5.1	Spínání cívek ve směru pohybu dopředu	53
5.2	Spínání cívek ve směru pohybu dozadu	53

Úvod

Diplomová práce se věnuje řízení lineárního pohonu pomocí detekce pohybu objektu. Práce je rozdělena na teoretickou část a na část praktickou. V první části teorie je popsán princip ultrazvuku a ultrazvukových senzorů, jelikož je to právě ultrazvukový senzor, který bude v konstrukci využit pro detekci objektu (určení vzdálenosti). Ve druhé kapitole jsou zmíněny i další způsoby, jak lze bezkontaktně měřit vzdálenost. Třetí kapitola se věnuje principu lineárních pohonů a jsou zde uvedené jednotlivé typy těchto lineárních pohonů. U jednotlivých typů pohonů jsou objasněny principy jejich funkce vedoucí k výběru vhodného motoru pro samotnou konstrukci. Vybraným motorem se stal motor krokový, proto je jeho část nejobsáhlejší.

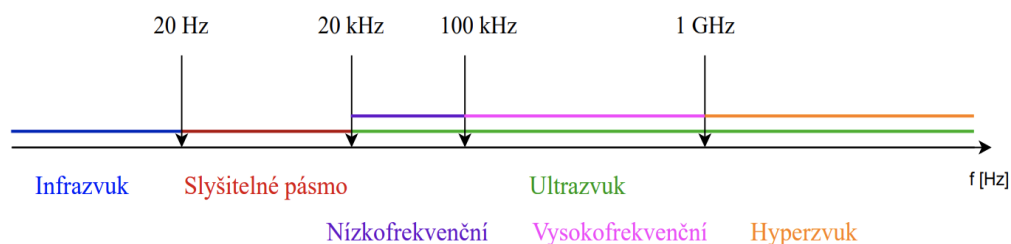
Následující část práce se již věnuje praktickému návrhu a samotnému řešení. Nejprve byla shrnuta hardwarová část a poté část softwarová. V této kapitole jsou uvedeny jednotlivé komponenty, které byly při řešení použity. U jednotlivých komponent jsou uvedeny základní informace popř. jejich schéma zapojení. V této kapitole je zobrazen počáteční návrh konstrukce v podobě 3D modelu, a také je zde 3D návrh konstrukce, která předpokládá stropní zavěšení i 3D návrh konstrukce pozemní, která slouží pro ověření funkčnosti. Práce obsahuje systémový návrh společně s vývojovými diagramy. Dále je zde popsán návrh softwarového řešení. V neposlední řadě je v práci popsána finální konstrukce zařízení.

1 Ultrazvukové senzory

1.1 Ultrazvuk

Ultrazvuk patří mezi mechanické vlnění s frekvencí nad 20 kHz. Tyto zvuky jsou pro lidské ucho neslyšitelné, a tudíž je člověk nijak nevnímá.

Podle frekvence tohoto vlnění je možné rozdělení do tří skupin. První skupinou je nízkofrekvenční ultrazvuk, jeho frekvence se pohybuje od 20 kHz po 100 kHz. Nízkofrekvenční ultrazvuk se používá především v ultrazvukové chirurgii, k čištění nástrojů a materiálů. Druhou skupinou je vysokofrekvenční ultrazvuk, který se pohybuje od 100 kHz výše. Využití vysokofrekvenčního ultrazvuku je v ultrazvukové terapii, kde se využívají frekvence 1 - 3 MHz a poté především v ultrazvukové diagnostice, při které se využívají frekvence 2 - 40 MHz. Třetí skupinou je hyperzvuk. Za hyperzvuk označujeme mechanické vlnění s frekvencí větší než 1 GHz. Na obr. 1.1 je patrné rozdělení podle frekvence, pojmem slyšitelné pásmo, je zamýšleno slyšitelné pásmo pro člověka. [17] [26] [30]



Obr. 1.1: Rozdělení ultrazvuku podle frekvence

1.2 Druhy ultrazvukového vlnění

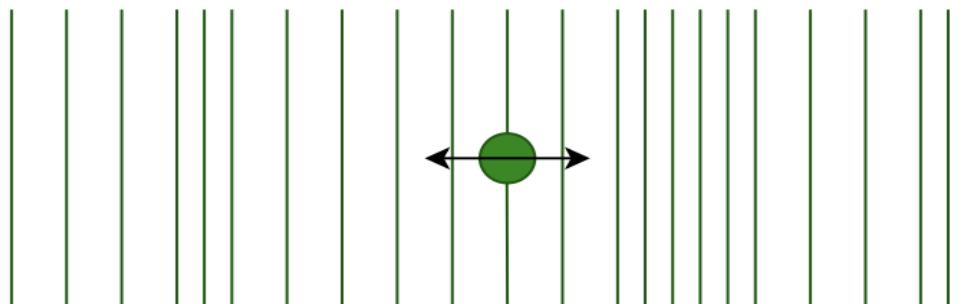
Vznik a šíření ultrazvukových vln prostředím je možné díky excitaci vazebných sil mezi částicemi látky. Šíření ultrazvukových vln může probíhat dvěma způsoby a to příčným vlněním (transverzálním), nebo podélným vlněním (longitudinálním).

Matematicky se dá popsat ultrazvukové vlnění vlnovou rovnicí:

$$\partial^2 \psi = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (1.1)$$

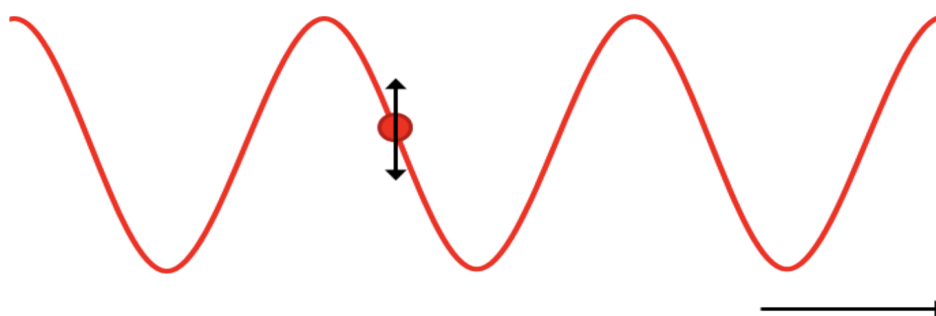
U podélného vlnění částice kmitají ve směru šíření vlnění. V případě podélného vlnění dochází ke střídavému zředování a zhušťování částic prostředí. Může se šířit

v plynech, kapalinách i pevných látkách. Podélné vlnění je zobrazeno na obr.1.2. [26] [30]



Obr. 1.2: Podélné ultrazvukové vlnění

U příčného vlnění částice kmitají kolmo na směr šíření vlnění. Příčné vlny se mohou šířit pouze prostředím, které odolává namáhání ve smyku - tuhém prostředí. Příčné vlnění je zobrazené na obr.1.3.



Obr. 1.3: Příčné ultrazvukové vlnění

1.3 Rychlost šíření ultrazvuku

Rychlost šíření ultrazvukové vlny je závislá na vlastnostech látkového prostředí, kterým se právě tato vlna šíří, jelikož ultrazvuková vlna může vzniknout pouze v takovém prostředí, které vykazuje elasticitu (pružnost) a setrvačnost. Elasticita je spojena s přenosem potenciální energie - kmitáním vlny, tj. schopností vytvořit v látce napětí. Elasticita je popsána modulem objemové pružnosti. Setrvačnost je oproti tomu spojena s přenosem kinetické energie - šířením prostorem, které je závislé na hustotě prostředí. Větší rychlost šíření mají pevné látky jako například kovy, nižší rychlost šíření mají plynné látky jako je např. vzduch. Rychlost šíření ultrazvuku je tedy dána vztahem:

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (1.2)$$

kde K je modul objemové pružnosti [Pa] a ρ je hustota prostředí [kg/m³].

Mezi další parametry, které udávají chování vlny, patří frekvence [Hz], vlnová délka λ [m] a již zmíněná rychlost šíření v [m/s]. [26] [30]

1.4 Zdroje ultrazvuku

Existují měniče, které vysílají a také přijímají ultrazvukové vlnění. Tyto měniče převádějí mechanickou energii ultrazvukových vln na energii elektrickou, a také naopak energii elektrickou převádějí na energii mechanickou. Rozlišujeme měniče piezoelektrické a měniče magnetostrikční.

1.4.1 Piezoelektrické měniče

Řada krystalických látek, jak přirozených, tak i uměle vyrobených, je charakteristická pro své piezoelektrické vlastnosti. V těchto krystalických látkách ionty vytvářejí krystalickou mřížku. Ionty v této mřížce jsou uspořádány tak, že se krystal deformuje, pokud se na něj přivede elektrické napětí a opačně, že při deformaci tohoto krystalu vzniká na jeho povrchu elektrické napětí. Tyto dvě situace označujeme jako přímý piezoelektrický jev a nepřímý piezoelektrický jev. Napětí je úměrné deformaci a mění s ní shodně znaménko. Polarizace jakéhokoliv dielektrika je spojena s určitou deformací, tomu se říká elektrostriktce. Elektrostriktce je obecnou vlastností látek a není podmíněna žádnou zvláštní strukturou dielektrika. Žádný opačný jev k elektrostriktci neexistuje. Deformace při elektrostriktci souvisí s energií elektrického pole a je tedy s určitým přiblížením úměrná čtverci intenzity elektrického pole.

Aby mohly látky vykazovat piezoelektrický jev, musejí splňovat určité strukturální podmínky. Tyto látky následně dělíme do tří skupin.

1. Látky, které se vyskytují ve formě monokrystalů a mají přirozené piezoelektrické vlastnosti. Těmito látkami jsou například: křemen, turmalín, vlny a další.
2. Látky uměle vytvořené, které se také vyskytují ve formě monokrystalů. Mezi tyto látky patří například: lithium niobát, lithium tantalát či germanium bizmut.
3. Poslední skupinou jsou látky, které patří mezi polykrystalické keramické materiály. Mohou to být například bariumtitanáty, niobáty, tuhé roztoky zirkoničitanu-titaničitanu olovnatého.

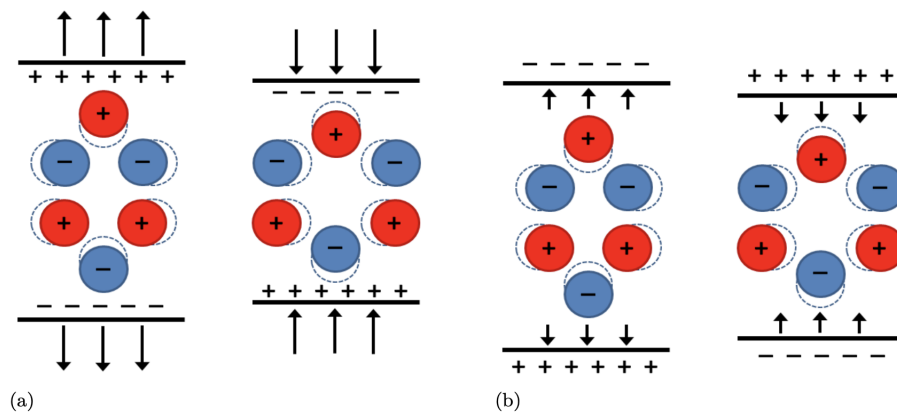
V dnešní době se v technické praxi dává přednost piezoelektrickým měničům poslední skupiny - piezokeramice, zejména pak těm na bázi tuhých roztoků PbZrO_3 - PbTiO_3 . [10] [26]

Přímý piezoelektrický jev

Přímý piezoelektrický děj je znázorněn na levé straně obr.1.4. Tento děj nastává při deformaci krystalu piezoelektrické látky. Při této deformaci dojde k posunu kladných a záporných iontů v krystalové mřížce, což způsobí, že se na povrchu krystalu vytvoří elektrický náboj. Velikost tohoto vytvořeného náboje je přímo úměrná deformaci krystalu. [10] [26]

Nepřímý piezoelektrický jev

Nepřímý piezoelektrický jev nastává přivedením elektrického napětí na povrch krystalu, při kterém dojde k posunu iontů v krystalové mřížce. Díky tomuto posunu dochází k deformaci krystalu. Podobně jako u přímého piezoelektrického jevu velikost vzniklé deformace krystalu je přímo úměrná přivedenému napětí. Tento děj je vyobrazen na pravé straně obr. 1.4 [10] [26]

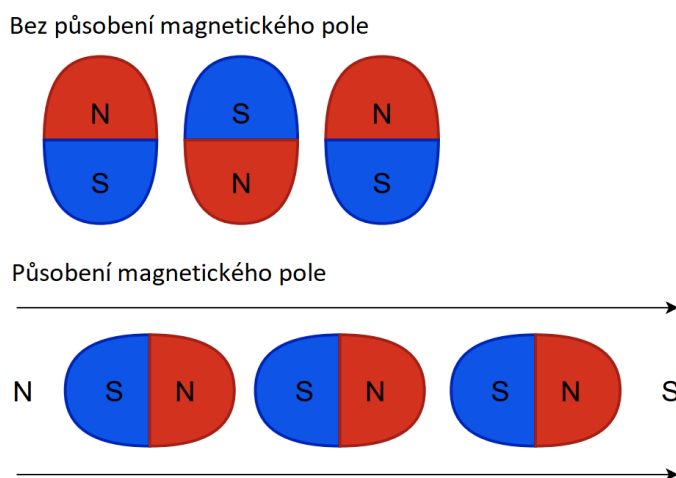


Obr. 1.4: Přímý piezoelektrický jev (a) a nepřímý piezoelektrický jev (b)

1.4.2 Magnetostrikční měniče

Magnetostrikční měniče využívají principu magnetostrikce viz obr.1.5. Při magnetostrikci dochází k deformaci magnetostrikčního materiálu po jeho vložení do magnetického pole, a také naopak u magnetostrikce při mechanickém namáhání magnetostrikčního materiálu dochází ke změně magnetizace a permeability látky. Tento jev se nachází především u feromagnetických materiálů, jako je například nikl či

kobalt. Tyto měniče produkují ultrazvukové vlny s frekvencí do 150 kHz, proto se v zobrazovacích systémech nevyužívají. Hlavní využití je proto hlavně v technických oborech. [10] [26]



Obr. 1.5: Princip magnetostrickce, kde N znázorňuje severní pól magnetu a S jižní pól magnetu

1.5 Ultrazvukové senzory

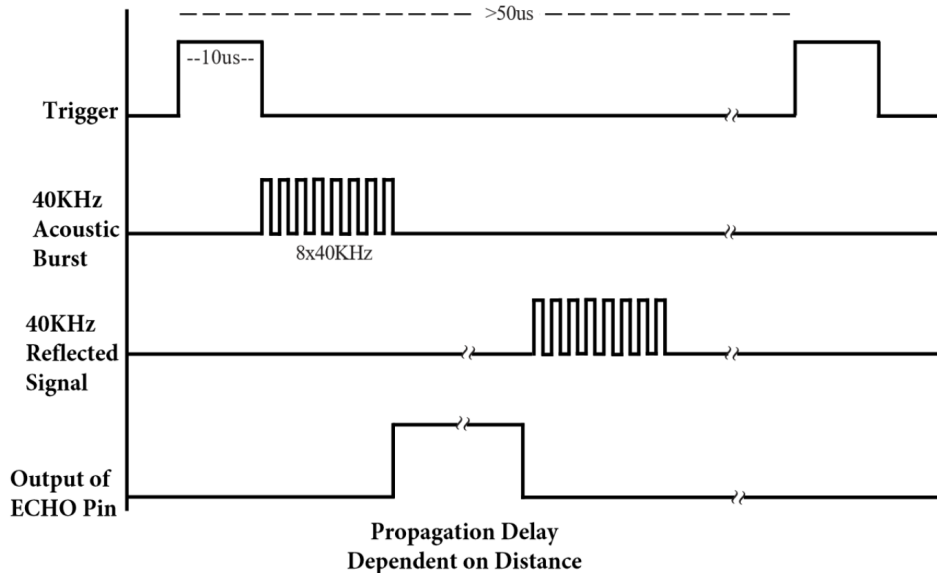
Ultrazvukové senzory se v dnešní době využívají ve více technických oblastech. Bezkontaktní měření vzdálenosti je velmi užitečné v oborech jako je automatizace, robotika, nebo přístrojová technika. Ultrazvukový senzor pracuje na stejných principech jako radarový systém. Dokáže převést elektrickou energii na akustické vlny a naopak.

Ultrazvukové senzory mohou měřit vzdálenost a detekovat přítomnost objektu od senzoru, aniž by byly ve fyzickém kontaktu s ním. Princip je v tom, že produkují ultrazvukovou vlnu a detekují její ozvěnu (tzv. echo). Ultrazvukový senzor generuje a vysílá ultrazvukové impulzy, které se poté odraží od objektu, který je v zorném poli snímače a míří zpět k senzoru. Ultrazvukový senzor je senzor, který využívá piezoelektrického jevu. Tento piezoelektrický snímač je schopen převést elektrický signál na mechanické vibrace a mechanické vibrace do podoby elektrického signálu.

Tyto senzory pracují na principu vyhodnocování času odezvy (echa). Tento způsob měření se označuje jako reflexní (difuzní), jelikož se vyhodnocení odezvy provádí na stejném místě, jako byl ultrazvukový signál vyslán. Princip detekce je zobrazen obr. 1.7. Měníč vyšle několik impulzů, které se šíří prostorem rychlostí zvuku. Když dávka těchto impulzů narazí na předmět, část vlnění se odrazí, a poté se vrací k senzoru zpět. Odezva, která se po určité časové době vrátí může být detekována buďto

tím samým měničem, ze kterého pocházela, nebo samostatným druhým měničem. Odezva je následně zesílena v zesilovači na signál pro další zpracování. Vyhodnocovací elektronika na základě zpoždění přijaté odezvy zjistí vzdálenost předmětu. [2] [29] [33]

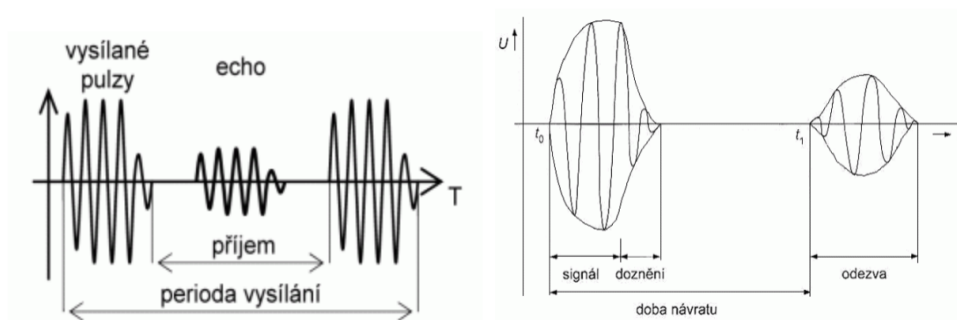
Typicky se pro komunikaci s ultrazvukovým senzorem používá mikrokontrolér. Pro zahájení měření vzdálenosti odešle mikrokontrolér spouštěcí signál do ultrazvukového snímače. Pracovní cyklus tohoto spouštěcího signálu je 10 μ s. Po spuštění generuje ultrazvukový senzor osm ultrazvukových vlnových impulzů a iniciuje časový čítač. Jakmile je přijat odražený signál, časovač se zastaví. Tento časový průběh je zobrazen na obr. 1.6. Výstupem ultrazvukového senzoru je vysoký impuls se stejnou dobou trvání, jaký je časový rozdíl mezi vysílanými ultrazvukovými záblesky a přijatou ozvěnou. [2] [29] [32]



Obr. 1.6: Ukázka časového průběhu a vysílání signálu z ultrazvukového senzoru, převzato z: [29]

Vzdálenost mezi senzorem a snímaným objekt lze snadno vypočítat, jelikož počítaná vzdálenost je vzdálenost uražená z ultrazvukového senzoru k objektu a zpět k měniči, tedy se jedná o oboustrannou cestu. Vydělením této vzdálenosti číslem 2 se tedy dá určit skutečnou vzdálenost od snímače k objektu. Ultrazvukové vlny se pohybují rychlostí zvuku, tedy 343 m/s při teplotě 20 $^{\circ}$ C. Vzdálenost se tedy získá pomocí následující rovnice:

$$d = \frac{v * t}{2} \quad (1.3)$$



Obr. 1.7: Princip detekce vysláním signálu a detekcí odražené odezvy převzato z: [15]

Výhody ultrazvukových senzorů

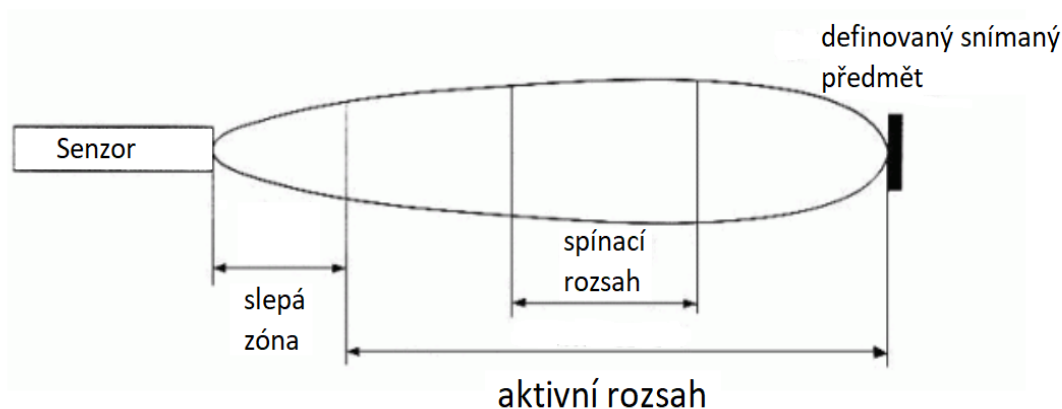
Výhodou ultrazvukových senzorů je to, že mohou detekovat různé materiály bez ohledu na jejich tvar, průhlednost, nebo barvu materiálu. Jediný požadavek na ultrazvukové snímání je to, že cílovým materiálem je pevná látka nebo kapalina. Díky tomuto umožňují ultrazvukové senzory bezkontaktní detekci pro řadu materiálů mezi které patří například: kov, plast, sklo, dřevo, voda, olej, nebo jiné tvrdé materiály, které pohlcují zvuk. Tyto materiály jsou schopny vzduchem odrážet zvuk zpět k senzoru a díky tomu jsme poté schopni určit jejich vzdálenost od senzoru. Mezi další výhody patří, že ultrazvukové senzory mohou fungovat za jakýchkoli nepříznivých podmínek, jelikož nebyvají příliš ovlivněné prachem, špínou, sněhem, deštěm, prostředím s vysokou vlhkostí či tmavým prostředím. [1] [31]

Nevýhody ultrazvukových senzorů

Jednou z největších nevýhod ultrazvukových senzorů je jejich vysoká citlivost na kolísání teploty. Díky jejich principu tj. tomu, že pracují se zvukem, nemohou ultrazvukové senzory pracovat ve vakuu. Sice již bylo zmíněno, že cílovým snímaným předmětem (materiálem) má být pevná látka či kapalina, pokud je ovšem tento předmět tvořen velmi tenkou tkaninou může dojít k absorpci zvukových vln a díky tomu může dojít k nepřesné detekci, což ve výsledku způsobí zkreslení vzdálenosti. [1] [31]

1.6 Základní parametry ultrazvukových senzorů

Základní informace o ultrazvukovém senzoru udává vyzařovací charakteristika. Tato vyzařovací charakteristika je definována dosahem a vyzařovacím úhlem viz obr.1.8. Ultrazvukové senzory tedy charakterizují tyto údaje:



Obr. 1.8: Základní parametry ultrazvukových senzorů, převzato z: [15]

Slepá zóna

Slepá, nebo také mrtvá zóna je oblast, která se nachází mezi senzorem a začátkem snímacího rozsahu. Slepá oblast vzniká jako důsledek dokmitávání membrány měniče, kdy senzor ještě nemůže přijímat odezvu. Z tohoto důvodu se tato oblast tedy nemůže používat pro měření.

Aktivní rozsah

Aktivní rozsah udává maximální dosah, uvnitř kterého může senzor zjistit přítomnost normou, nebo výrobcem definované clonky. Clonka může být čtvercová, nebo kulatá a je umístěná kolmo k ose vyzařovací charakteristiky.

Spínací rozsah

Spínací rozsah je námi zvolená část z aktivního rozsahu. V této části dochází při zjištění snímaného předmětu k aktivování výstupu. Obvykle se nastavuje kalibrací senzoru - často tzv. teach mód.

Úhel odklonu

Úhel odklonu udává maximální přípustné odklonění roviny clonky. Jelikož se s různou drsností materiálů tento úhel mění, bývá většinou u výrobců v praxi tento parametr pro tyto různé materiály uváděn.

Rychlost přeběhu

Rychlost přeběhu značí maximální rychlost v radiálním směru, kterou se ještě může určitý sledovaný předmět pohybovat tak, aby senzor tento předmět zachytil.

Reakční doba

Reakční doba je maximální doba mezi vysláním impulsu a následném aktivováním výstupu. Od reakční doby je odvozena maximální spínací frekvence.

Maximální přibližovací rychlost

Maximální přibližovací rychlost je maximální rychlost s jakou se může detekovaný předmět přibližovat v axiálním směru, aby mohlo ještě dojít k jeho detekci. Tuto rychlost omezuje časové okno vymezené aktivní oblastí, jelikož zde musí stihnout vyslat ultrazvukový impuls a poté ho ještě zachytit. [15]

2 Jiné způsoby bezkontaktního měření vzdálenosti

2.1 Optické senzory pro měření vzdálenosti

Optické senzory pracují na základě optických vlastností. Princip je takový, že je zde kužel světla, který je ze zdroje usměrněný optickou soustavou. Toto světlo dopadá na detekovaný předmět, od kterého se poté odráží. Odražené světlo je následně optickou soustavou usměrněno na fotocitlivý prvek. Díky optice jak přijímače, tak i vysílače je zajištěno vzájemné protnutí světelných bodů. K tomuto protnutí dochází v malé oblasti, která se nazývá citlivá zóna.

Jako zdroj světla zpravidla bývá LED, která pracuje v oblasti viditelného či infračerveného světla. V dnešním době se také začínají používat polovodičové a plynové lasery. Jako přijímač většinou bývá fotodioda, PSD prvek či fototranzistor. Jejich výhodou bývá poměrně přesné měření polohy a velká rozlišovací schopnost. [15] [21]

2.2 Indukční senzory pro měření vzdálenosti

Indukční senzory jsou polovodičové součástky, které pracují s vysokou spínací frekvencí. Indukční senzory pracují na základě magnetického pole. Toto magnetické pole se tvoří na přední straně snímače v otevřeném magnetickém obvodu. Základním principem je tlumení magnetického pole pomocí blížícího se kovového předmětu. Amplituda vnitřního oscilačního obvodu je tlumením snižována, dokud není dosaženo spínací prahové hodnoty a snímač vydá spínací signál. Jeho výhodou je, že pokud nedojde k mechanickému poškození, mají indukční senzory téměř neomezenou životnost. Tyto senzory pracují bez zpětného působení. Mezi další výhody patří, že jsou tyto senzory uzavřené v odolném pouzdru, díky tomu jsou odolné vůči provoznímu prostředí, tím pádem se vyznačují vysokou spolehlivostí, jelikož nejsou nijak ovlivňovány. [5] [15]

2.3 Kapacitní senzory pro měření vzdálenosti

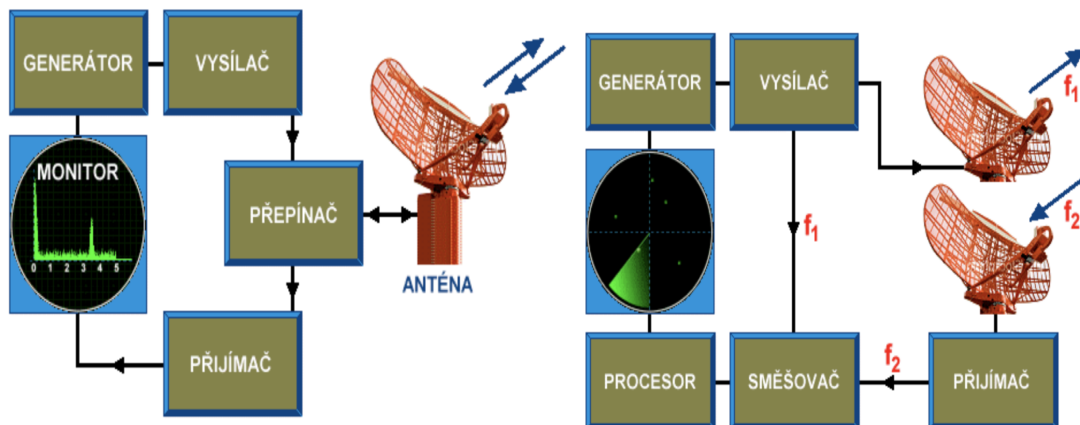
Kapacitní snímače umožňují bezkontaktně detekovat předměty na vzdálenost až několika desítek mm. Oproti indukčním sensorům, které detekují jen elektricky vodivé materiály, mohou kapacitní senzory detekovat jak ty nevodivé, které se tváří jako dielektrikum, tak i ty vodivé. V takovémto případě se jako dielektrikum považuje

vzduch mezi senzorem a detekovanou kovovou ploškou. Tudíž je jejich hlavní výhodou možnost detekovat prakticky libovolný materiál a montážní provedení bude obvykle shodné s indukčními snímači. [4] [15]

2.4 Určení vzdálenosti pomocí rádiových vln

Při této detekci je zapotřebí radarová anténa (radar), která vysílá krátké rádiové impulsy s velmi vysokým výkonem, tj. elektromagnetické vlny, které se nacházejí ve frekvenčních oblastech mikrovln. Tyto rádiové impulsy se šíří určitým směrem (dle směrovosti antény) rychlostí světla. V případě, že by se v cestě nacházela překážka, část energie impulsu by se rozptýlila do všech směrů. Ovšem zbytek energie, která se nerozprýlí, odraží se zpět k radaru. Radarová anténa poté tuto energii přijme a zpracuje. Výsledná vzdálenost se vypočítává z doby zpoždění vysokofrekvenčního vysílaného a opět zachyceného signálu, a také rychlosti šíření.

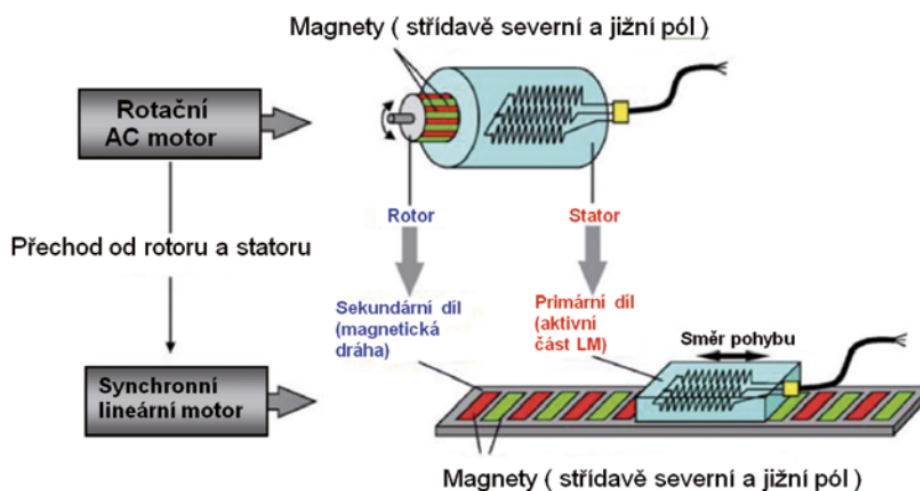
K určení vzdálenosti pomocí rádiových vln jsou dva režimy vysílání, které je možné využít. Oba tyto režimy jsou ukázány na obr. 2.1. Prvním z nich je kontinuální, který má dvě radarové antény, kdy radar neustále vysílá impulsy a druhý radar neustále přijímá impulsy. Druhým režimem vysílání je režim pulzní, který má pouze jednu anténu. U této radarové antény dochází k střídavému připojení k vysílači a k přijímači. Nejprve se z radarové antény vyšle krátký elektromagnetický impuls a po přepnutí se přijímá signál odražený. [3] [23]



Obr. 2.1: Princip určení vzdálenosti pomocí rádiových vln, na levé straně je zobrazen pulzní radar a na pravé straně je zobrazen radar s kontinuální vlnou, převzato z: [3]

3 Lineární motor

Mezi motory vytvářející lineární pohyb patří především lineární motor. Lineární motor je elektrický indukční motor, který se pohybuje v přímce. U klasického elektrického motoru se rotor, což je rotující část, točí uvnitř statoru, který představuje statickou část. V lineárním motoru je stator rozbalen a položen naplocho a rotor se kolem něj pohybuje v přímce. Na obrázku 3.1 můžeme vidět rotor, který se točí uvnitř statoru a celý motor je upevněn na svém místě. Lineární motory často používají supravodivé magnety, které jsou chlazeny na nízké teploty, aby se snížila spotřeba energie.



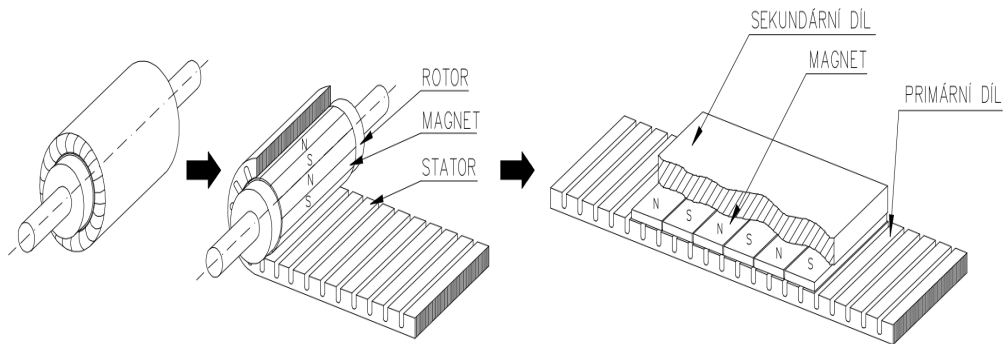
Obr. 3.1: Porovnání rotačních motorů a lineárních motorů, převzato z: [13]

Lineární motory se nyní používají ve všech typech strojů, které vyžadují lineární pohyb jako například mostové jeřáby. Dnes jsou také známé jako zdroj hnací síly v nejnovější generaci maglevů (vysokorychlostních vlaků). Ovšem z důvodu finanční nákladnosti a nekompatibility se stávajícími železnicemi je nepravděpodobné, že by maglevy byly v následující době široce používány. [13] [16] [34]

3.1 Princip a konstrukce

Lineární motor (LM) pracuje na indukčním principu, pro představu ho můžeme vnímat jako klasický rotační motor, který je rozvinutý do roviny viz obr. 3.2, a tudíž umožňuje přímočarý pohyb. Lineární motor provádí tento lineární pohyb bez mechanického převodu, který mění pohyby rotační na lineární. Toto je hlavní rozdíl a velká výhoda lineárních motorů oproti rotačním přístrojům, které obsahují právě tento mechanický převod, jelikož u lineárních motorů se nenacházejí problémy, které

by byli spojené s tímto převodem. Těmito problémy může být například vůle, tření, nebo strukturální rezonance. K velkému rozvoji výroby LM a k jejich praktickému uplatnění došlo až v posledních deseti letech, a to díky technickému vývoji a cenové dostupnosti výkonové elektroniky. [13] [16] [34]



Obr. 3.2: Ukázka lineárního motoru a jeho konstrukčních komponent, převzato z [16]

Vytvoření posuvné síly u lineárních motorů vzniká interakcí magnetického pole a primární a sekundární částí LM. Lineární motory se skládají tedy z hlavních dvou částí. Část primární se nazývá stator (může být tako označován jako jezdec) a sekundární část se říká rotor. Stator, primární část, se skládá z feromagnetického svazku složeného z elektrotechnických plechů a trojfázového vinutí, které je uložené v jeho drážkách. Ve statoru se taktéž nachází Hallova sonda a teplotní čidlo, které jsou zapotřebí pro řízení motoru.

U synchronních motorů je protiprimární části - statoru konstrukčně uspořádána sekundární část - rotor. Sekundární část je tvořena permanentními magnety ze vzácných zemin (např. Nd-Fe-B). Tato část je nalepena na ocelovou podložku a zalita v pryskyřici.

U asynchronních motorů je rotor, sekundární část, tvořen klecí, která je nakrátko uloženu v drážkách feromagnetického svazku, případně je připevněna na ocelovou podložku poháněného zařízení.

Rotor, neboli sekundární část tvoří zpravidla delší část stroje. Konstrukční uspořádání stroje určuje, která část lineárního motoru se bude pohybovat. Ovšem ve skutečnosti u většiny konstrukcí stroje se po dráze libovolného počtu sekundárních částí - rotorů pohybuje primární část - stator. U takovýchto konstrukcí je zapotřebí pohyblivý napájecí kabel a také kabel snímače polohy. V případě, že by bylo použito vodní chlazení je také zapotřebí pohyblivý přívod a odvod chladicí kapaliny.

Pokud přivedeme do primární části (statoru) řídicí proud, dojde ke vzniku magnetické pole mezi oběma částmi a to způsobí pohyb sekundární části (jezdce). Úrovní proudu můžeme ovládat rychlost a sílu pohybu. [6] [13] [16] [34]

3.2 Výhody a nevýhody lineárních motorů

Lineární motory mají řadu výhod, mezi které patří například: vysoká rychlost, rychlá odezva, vysoká přesnost, bezúdržbový (nízkoúdržbový) provoz.

Lineární motory mohou mít velmi vysokou maximální rychlost. To je zapříčeno tím, že maximální rychlost lineárního motoru je omezena pouze napětím sběrnice a rychlostí řídicí elektroniky. Typická rychlost lineárních motorů je až 3 metry za sekundu.

Lineární motory mají velmi rychlou odezvu, míra odezvy poháněného lineárním motorem může být více než 100 krát větší než mechanický převod.

Lineární motory jsou velmi kompaktní, a tím pádem vyžadují menší montážní prostor při menším počtu součástek. Tím pádem je zaručen jednodušší chod a bývá i tišší chod. Dnešní lineární motory dokonce nemají žádné přídatné díly, nedochází tedy k opotřebení, a tudíž je jejich provoz bezúdržbový. [6] [9] [13] [19]

Lineární motory mají ale také řadu nevýhod, mezi které můžeme zahrnout především: vysokou pořizovací cenu, náročnou konstrukci či potřebu chlazení.

Lineární motory mají velmi vysokou pořizovací cenu. To je způsobeno například cenou magnetů, jelikož většina konstrukcí lineárních motorů připevňuje magnety vzácných zemin na délku kolejnice a náklady na tyto magnety jsou tudíž vysoké.

Jelikož jsou lineární motory citlivé na teplo, je třeba použít určité technické opatření. Oblíbeným řešením bývá chlazení vzduchem. [6] [13]

3.3 Typy lineárních motorů

Existují různé typy lineárních motorů, protože každý z nich kompromituje jeden aspekt výkonu, aby vynikl v jiném. Existují čtyři hlavní atributy, ve kterých existuje kompromis ve výkonu: hustota toku, únik toku, pohyb hmotnosti a ozubený moment.

Hustota toku

Prvním atributem je hustota toku, která představuje velikost magnetického pole, které lze generovat v určitém prostoru. Pokud by mělo zařízení vysokou hustotu toku, tak zpravidla poskytuje vynikající sílu, nebo umožňuje podobnou sílu v kompaktnější velikosti.

Únik toku

Dalším atributem je únik toku, který poskytuje informaci o tom, jak dobře je elektrické pole obsaženo v motoru. Většinou bývá upřednostňováno, aby byl únik toku

nízký. Nízký únik toku je dobrý k tomu, aby se zabránilo magnetickému poli ovlivňovat jiné součásti systému. Kromě toho únik toku také naznačuje nižší elektrickou účinnost motoru.

Pohybující se hmotnost

Třetím atributem je pohybující se hmotnost. Tento atribut je hmotnost pohybujících se součástí motoru. Pokud je pohybující se hmotnost vyšší znamená to nižší zrychlení pro dva motory, z nichž každý má stejný výkon.

Aretační síla

Poslední atribut představuje aretační sílu, to je síla, která je přítomna v každém lineárním motoru, který používá železo a přitahuje železo k permanentním magnetům. Když je motor napájen a pohybuje se, má za následek zvlnění cyklické síly přes rozsah cesty. [34]

3.4 Synchronní motor

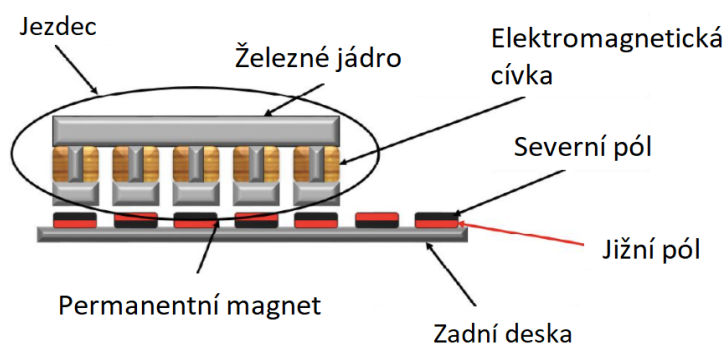
Synchronní motor má rotor, který je navržen tak, aby se otáčel stejnou rychlostí jako magnetické pole otáčející se statorem. Rotor je navržen tak, aby generoval magnetické póly. Tyto magnetické póly jsou stejné nebo integrální násobky pólů statoru. Pokud je rotor a stator pod napětím, magnetické pole rotoru se uzamkne s rotačním magnetickým polem statoru a otáčí se přesnou rychlostí pole statoru. Následkem setrvačnosti se synchronní motor okamžitě nespustí synchronní rychlostí (RMF). Z toho plyne, že synchronní motory nejsou samostartující, ale potřebují zvláštní startovací mechanismus. Tímto mechanismem, který slouží k zajištění točivého momentu, je přídatné vinutí zvané „vinutí tlumiče“. Při spuštění funguje jako indukční motor.

Synchronní motor může být buď samostatně buzený, který vyžaduje samostatný stejnosměrný zdroj, který napájí vinutí rotoru a generuje magnetické pole, nebo to může být nevybuzený motor, jehož rotor je určen k magnetizaci magnetickým polem rotačního statoru a otáčí se s tím.

Rotor synchronního motoru se otáčí synchronní rychlostí, která závisí na napájecí frekvenci a pólech vinutí statoru. Proto se otáčky motoru nemění se zátěží. Aby bylo možné měnit rychlost synchronního motoru, je třeba měnit napájecí frekvenci. Napájecí frekvence se mění pomocí VFD (frekvenčního měniče). [14]

3.4.1 Se železným jádrem

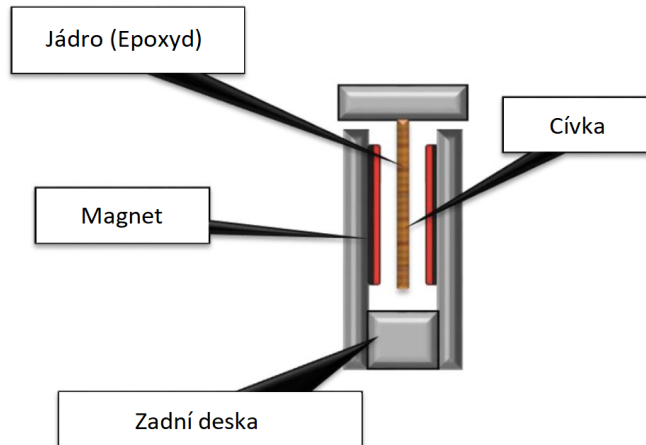
Tento typ lineární motorů, jak už z názvu vyplývá má v motoru železo. Lineární motor se železným jádrem je pravděpodobně nejznámější lineární motor a existuje již delší dobu. Často je také označován jako lineární motor se "zuby", kde zuby v tomto případě znamenají výčnělky mezi drážkami. Tento motor má svůj design přímo odvozený ze střídavého rotačního motoru. Lineární motor se železným jádrem se skládá z ploché železné kolejnice, ke které jsou připojeny permanentní magnety vzácných zemin. Primární díl je vyroben z laminací a vinutí cívky kolem „zubů“ laminace. Tepelné senzory jsou namontovány interně na vinutí a snímají teplotu. Senzory Hallova efektu jsou buď namontovány v oblasti cívky, nebo jsou namontovány na okraji motoru. Tyto senzory se aktivují magnety na kolejnici a používají se pro komutaci vinutí. Tento typ motoru je patrný na obr.3.3. [6] [18]



Obr. 3.3: Lineární motor se železným jádrem, upraveno z: [18]

3.4.2 Bez železného jádra

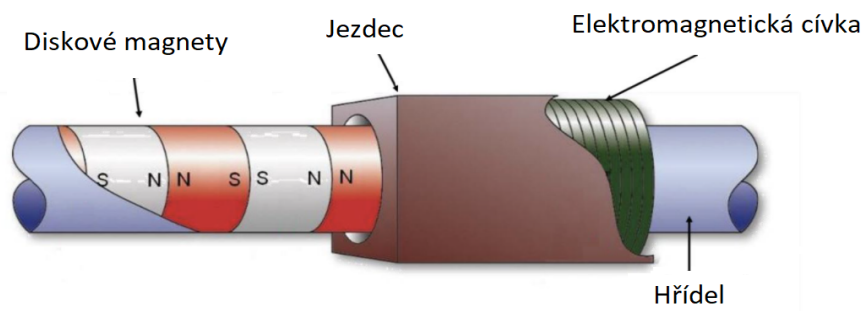
Lineární motor bez železného jádra označován také jako „AirCore“ lineární motor, „Toothless“ či „U-channel“, který je ukázán na obr.3.4, se skládá ze dvou magnetických kolejnic, které jsou umístěny proti sobě (na sever a na jih). Distanční lišta mezi nimi brání oběma stranám v uzavření k sobě. Primární díl je vyroben z cívek navinutých a držných pohromadě epoxidem. Tato sestava vinutí je poté zakončena hliníkovou tyčí. K upevnění břemene, a také k odvodu tepla se využívá lišta. Samotné vinutí nemá v sobě železo, tedy názvy jádra „vzduchové“ nebo „bez železné.“ Stejně jako u lineárního motu se železným jádrem jsou tepelné senzory a senzory Hallova jevu namontovány na primární díl. [6] [18]



Obr. 3.4: Lineární motor bez železného jádra, upraveno z [18]

3.4.3 Trubkové

Trubkové lineární motory představují odklon od konstrukčního přístupu jiných typů lineárních motorů. Namísto toho, aby elektromagnetické cívky interagovaly s permanentními magnety při jízdě přes ploché magnety, má trubkový lineární motor cívky obklopující magnety ve tvaru disku. Orientace magnetických pólů tohoto tvaru magnetu vytváří magnetický tok 90° vzhledem k cívám. Z obrázku 3.5 je patrné, že trubkové cívky lineárního motoru zcela obklopují magnety, a tím pádem využívají veškerý magnetický tok permanentních magnetů. [18]



Obr. 3.5: Trubkový lineární motor, upraveno z:[18]

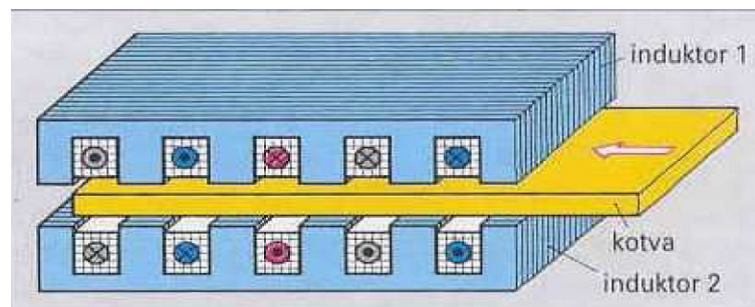
3.4.4 Bezdrážkové

Bezdrážkový motor, který se také může označovat jako hybridní motor je populárním motorem, který vzniká konstrukční kombinací lineárních motorů se železným jádrem a bez železného jádra. Bezdrážkový motor využívá stejné kolejnice s permanentními magnety ze vzácných zemin jako využívají lineární motory, které jsou se železným jádrem.[6]

3.5 Asynchronní motory

V případě asynchronního motoru je tomu tak, že rychlost rotoru je asynchronní s rychlostí otáčení magnetického pole statoru. Pro přesnost, rotor asynchronního motoru se otáčí s relativně menší rychlostí než stator RMF. Je to způsobeno prokluzem mezi rychlostí statoru a rotoru. Rotor asynchronního motoru je buď veverková klec vinutého rotoru. Rotor klece veverky je konstruován pomocí těžkých měděných tyčí spojených na konci pomocí vodivého prstence, který je elektricky zkratuje. Navinutý rotor je vyroben z několika vinutí na vrcholu ocelového laminovaného jádra.

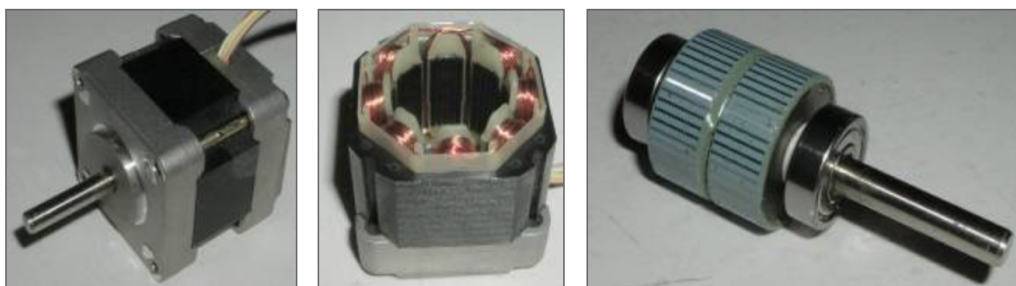
Rotační magnetické pole statoru způsobuje indukovaný proud v rotoru. Tento indukovaný proud proudí uvnitř rotoru a vytváří své vlastní magnetické pole. Rotorové pole se staví proti příčině, která jej generuje, a pokouší se ho eliminovat tím, že dohání rychlost statoru RMF (synchronní rychlostí). Rotor se přitom otáčí ve směru statoru RMF. Díky tomu, že asynchronní motor funguje na principu indukce, bývá označován i jako indukční motor. Takovýto motor je zobrazen na obr. 3.6. [13] [14]



Obr. 3.6: Lineární asynchronní motor, převzato z:[13]

4 Krokové motory

Dalším typem motorů, který vytváří lineární pohyb je motor krokový viz obr. 4.1. Sám o sobě krokový motor nepatří mezi lineární motory nýbrž je motorem rotačním, proto se často používá s jiným druhem mechanismu pro vytvoření lineárního pohybu. Krokový motor, je motor, který umí přesně nastavit svoji polohu a tuto polohu si umí udržet i přes ostatní působící síly. Krokové motory patří mezi synchronní motory, kde je ovšem točivé magnetické pole vytvářeno postupným zapínáním jednotlivých cívek statoru, oproti jiným synchronním motorům, kde toto pole zajišťuje střídavý proud. [12] [25] [28]



Obr. 4.1: Krokový motor (vlevo), stator krokového motoru (uprostřed), rotor s hřídelí (vpravo), převzato z:[25]

4.1 Princip pohybu

Krokový motor se také skládá z ze statoru a rotoru. U krokových motorů je stator nepohyblivá část, která se skládá z několika po různu zapojených dvojic cívek, nejčastěji to bývají 4 dvojice. Rotor, který vypadá jako váleček, bývá usazen v hřídeli v ložiscích rotuje v závěsu za rotujícím magnetickým polem vytvořeným kolem statoru. Tím, že cívkami statoru začne protékat proud, kolem nich vzniká magnetické pole. Podle velikosti a směru proudu, který protéká cívkou, jsou závislé směry a intenzity těchto jednotlivých magnetických toků. [28]

Tím, že je tedy cívka napájena, tak vzniklý elektromagnet přitahuje magnet. Tento magnet je zubem, který je součástí rotoru. Zub se tedy posouvá ke vzniklému elektromagnetu vždy o určitý offset, a poté se celý rotor společně s hřídelí otáčí o úhel. Tento úhel není náhodný, je to úhel, při kterém jeho poloha klade nejmenší odpor magnetickému toku, nebo výslednici mnoha toků. Ve chvíli kdy tento proces skončí, zub se přesune o již určený offset, dochází k zapínání dalšího elektromagnetu, a tedy dalšímu pohybu zubu, tedy pohybu mezi rotorem a statorem. Tím, že bude docházet k přepínání cívek, tak lze provádět kroky (pohyby zubu) jak vpřed, tak

i vzad. Kromě toho, jelikož je zub přitahován výsledným polem vznikajícím kolem sady elektromagnetů, lze také provádět nejen práci v režimu celého kroku, ale dá se též provádět práce v režimu půl kroku či méně, čemuž se říká práce v režimu microstep (mikrokroku). [28]

4.2 Výhody a nevýhody krokových motorů

Mezi výhody krokových motorů patří např. to, že úhel natočení hřídele je přímo úměrný počtu vstupních impulsů a rychlost točení je úměrná frekvenci vstupních impulsů. Krokové motory mají velký statický moment a obousměrný provoz. Zároveň mají krokové motory v porovnání s jinými mnohem vyšší životnost, jelikož nemají kartáčky a kumulátor. Krokové motory mají také rychlou a přesnou reakci na zrychlení či zpomalení nebo na změnu směru otáčení. [11]

Jednou z nevýhod krokových motorů je, že nejsou vhodné pro extrémě vysoké rychlosti otáčení. Dalším závažným problémem může být, že pokud dojde ke ztrátě kroku, je také ztracena poloha poháněného stroje a systém musí být znovu inicializován. Další nevýhoda je náchylnost při určitých rychlostech otáčení k rezonancím. [11]

4.3 Režimy krokových motorů

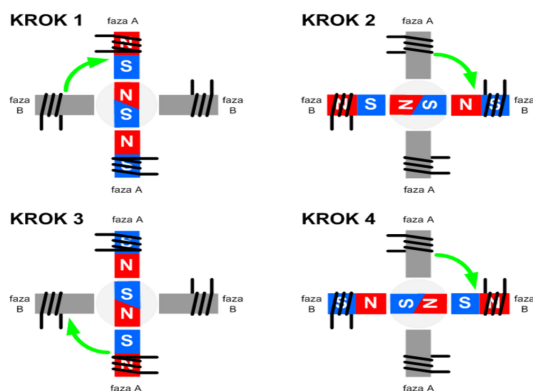
U krokových motorů rozlišujeme dva případy režimů, ve kterých může systém pracovat. Těmito režimy je režim celého kroku a režim půlkroku.

4.3.1 Práce v režimu celého kroku

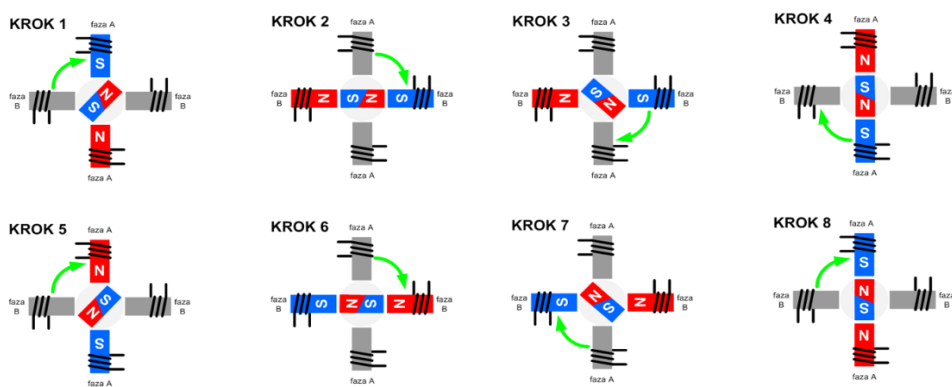
V tomto režimu se motor otáčí o úhel daný jeho konstrukcí, tj. že na jeho jednu otáčku je zapotřebí tolik kroků, kolik zubů obsahuje daný stator určitého motoru. Princip práce v tomto režimu je uveden na následujícím obrázku 4.2. [28]

4.3.2 Práce v režimu půlkroku

V případě práce v režimu s polovičním krokem je vyžadováno střídající se napájení dvou fází (cívek). Díky tomu se dosáhne dvojnásobné přesnosti (fázové rozlišení se zdvojnásobí) a práce motoru je hladší. Zde je práce motoru uvedena na obrázku 4.3. [8] [28]



Obr. 4.2: Princip funkce motoru v režimu celého kroku při dvoufázovém napájení, převzato z: [28]



Obr. 4.3: Princip funkce motoru v režimu půlkroku při dvoufázovém napájení, převzato z: [28]

4.3.3 Práce v režimu mikrokroku

Práce v režimu mikrokroku bývá často využívána, jelikož díky tomu, že se krok dělí na ještě kratší úseky než tomu bylo u práce v režimu půlkroku, je zajištěna hladká práce motoru a velká přesnost polohování. Jednotlivé polohy jsou získány díky výslednému magnetickému toku cívek, které jsou napájeny schodovitým průběhem. [28]

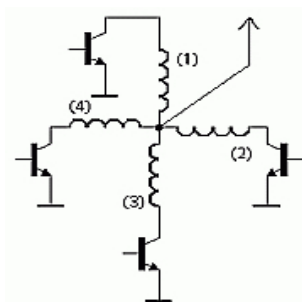
4.4 Metody řízení krokových motorů

U řízení krokových motorů existují dvě metody, jak může být motor řízen. Jejich rozdíly jsou především v tom s kolika polaritami proudu (napětí) pracují, dále v kon-

strukci a velikosti kroutícího momentu. První metodou je unipolární řízení a tou druhou je řízení bipolární. Zapojení těchto metod je patrné na obr. 4.4 a na obr. 4.5.

4.4.1 Unipolární řízení

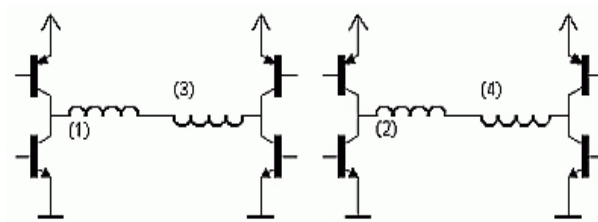
V případě unipolárního řízení prochází proud v jednom okamžiku právě jednou cívkou. Výhodou je, že díky tomu má takovýto motor nejmenší odběr, ovšem je tomu tak za cenu nejmenšího kroutícího momentu. Konstrukce je v tomto řešení velmi jednoduché zapojení řídicí elektroniky. V praxi se to provede za pomoci jednoho tranzistoru na každou cívku. [8] [25] [28]



Obr. 4.4: Schéma zapojení unipolárního řízení, převzato z: [25]

4.4.2 Bipolární řízení

U bipolárního řízení je tomu jinak, proud zde vždy prochází dvěma cívkami, tyto cívkou musí být protilehlé, tudíž jsou zapojené tak, že mají navzájem opačně orientované magnetické pole. Díky tomuto složitějšímu zapojení, které se provede s pomocí 2 H můstků, je zapotřebí větší počet kontrolních linek, či nutnost použití přídavné logiky pro redukci těchto kontrol. Výhodou zde však je vyšší kroutící moment, kterého se dosáhne při vyšší spotřebě proudu. [8] [25] [28]

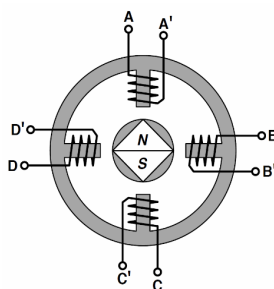


Obr. 4.5: Schéma zapojení bipolárního řízení, které je na první pohled složitější od unipolárního. Převzato z: [25]

4.5 Typy krokových motorů

4.5.1 Krokový motor s trvalým magnetem

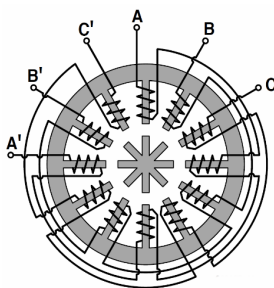
Krokový motor s trvalým magnetem je motor jednoduché konstrukce patrné na obr.4.6. Na jednu otáčku většinou mívají 24 až 48 kroků. Tyto krokové motory mají velký krouticí moment, a to díky nemagnetovým pólům rotoru, které zvyšují magnetickou indukci. Konstrukce je provedena tak, že motory mají více pólů rotoru. Pro zvýšení přesnosti polohování, které doprovází zvýšení počtu kroku, je na jejich rotoru nainstalováno několik magnetů. [28]



Obr. 4.6: Krokový motor s trvalým magnetem, převzato z: [11]

4.5.2 Krokové motory s proměnlivou reluktancí

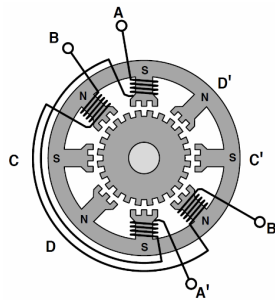
Tento typ patří mezi jeden z prvních modelů krokových motorů, v dnešní době se ale již moc nepoužívají. Jejich konstrukce není složitá viz obr.4.7, rotor je složen z velkého množství zubů, které jsou vyrobeny z měkkého železa. Pokud jsou cívky rotoru napájeny stejnosměrným proudem, je zub přitahován magnetickým pólem. V porovnání s krokovými motory s trvalým magnetem je zde mnohem menší krouticí moment. [28]



Obr. 4.7: Krokový motor s proměnlivou reluktancí, převzato z: [11]

4.5.3 Hybridní krokový motor

V dnešní době zřejmě nejpoužívanějším typem krokových motorů je hybridní krokový motor. Rotor motoru se skládá z permanentních magnetů, které jsou ovšem namontovány axiálně. Rotor se tedy skládá ze dvou prstenců, které jsou zmagnetovány s opačnou orientací. Právě tyto prstence mají vyřezané drážky - zuby rotoru, to je patrné na obr. konstrukce 4.8 Oproti předcházejícím modelům disponuje hybridní krokový motor velkým rozlišením, což je zřejmě jeho největší výhodou, proto je mnohem více spolehlivější a přesnější. Dále má větší kroutící momentu a dosahovanou rychlost otáčení. [28]

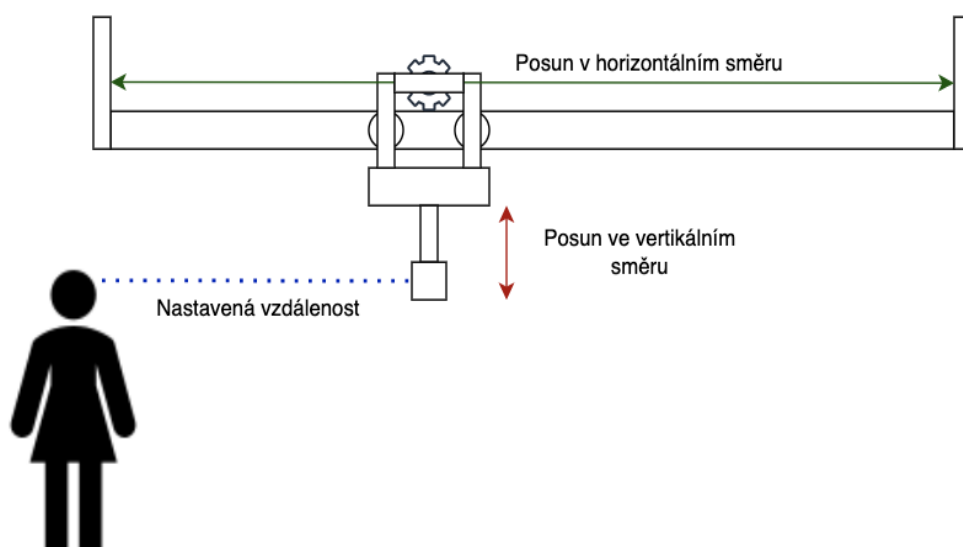


Obr. 4.8: Hybridní krokový motor, převzato z: [11]

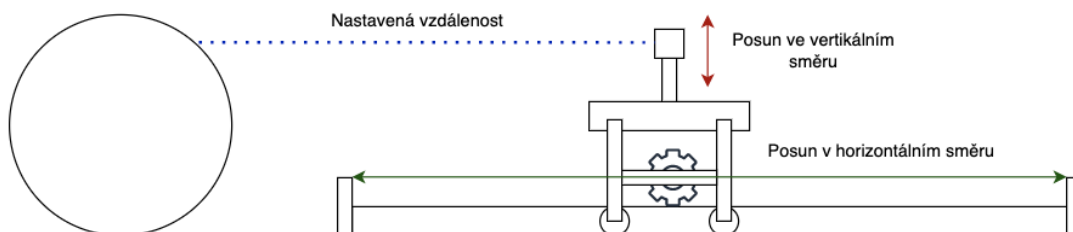
5 Návrh řešení

Na obrázku 5.1a 5.2 jsou uvedeny jednoduché konstrukční návrhy. V prvním případě se jedná o závěsnou možnost (stropní konstrukci), jak by mělo vypadat finální zařízení. V druhém případě se jedná o návrh konstrukce na zemi, tento návrh bude zkonstruován a na něm bude provedena kontrola navrhnutého systému.

Obě tyto možnosti se dají využít k detekci objektu a řízení motoru v závislosti na konstantní vzdálenosti od objektu, k čemuž je využíván ultrazvukový senzor. Systém by měl umožňovat sledování objektu do rychlosti 1,5 m/s, tento objekt se bude pohybovat pouze v jedné ose.



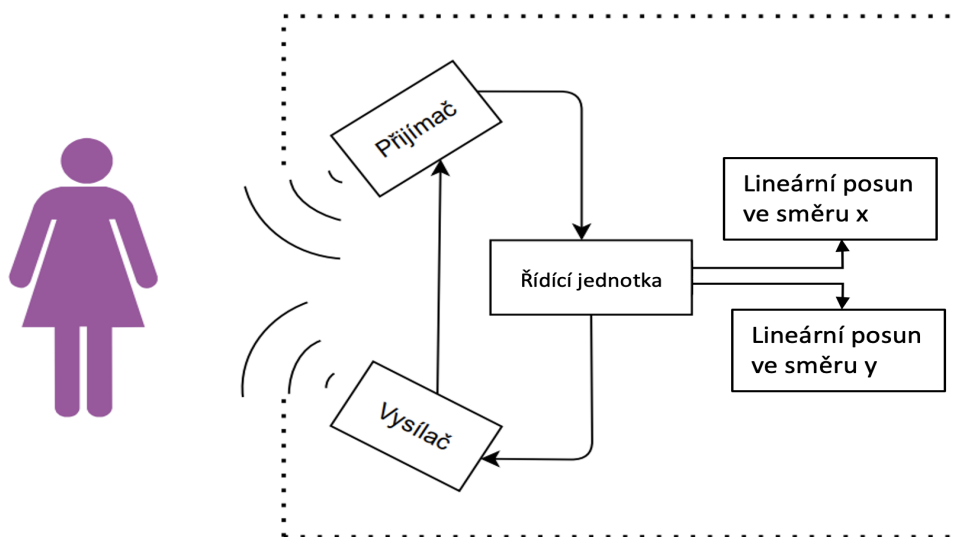
Obr. 5.1: Návrh konstrukce závěsného schématu



Obr. 5.2: Návrh konstrukce pro variantu na zemi

5.1 Blokové schéma

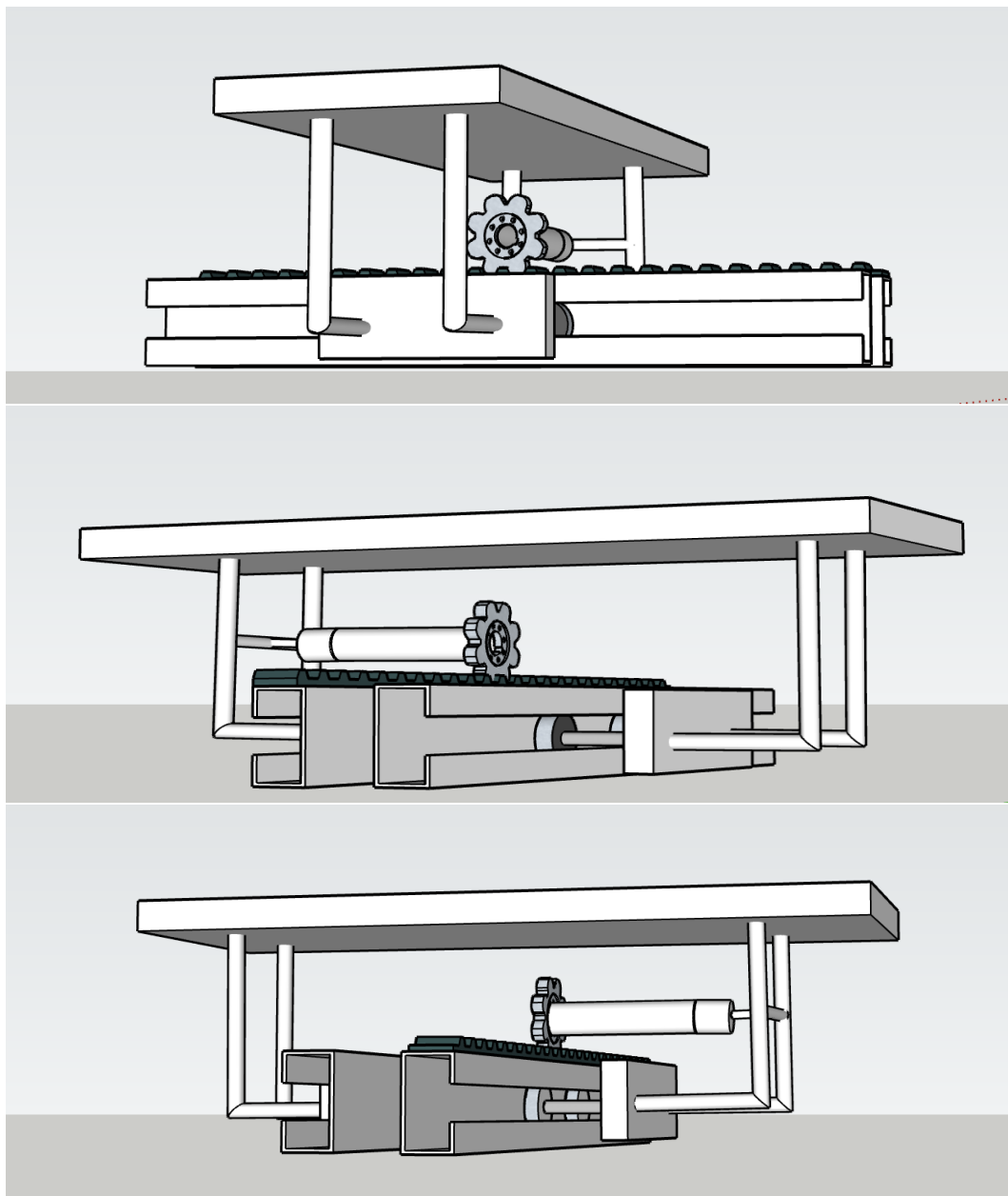
Na obrázku 5.3 je znázorněno blokové schéma navrženého přístroje, ze kterého bude práce vycházet. Jsou zde znázorněny části ultrazvukového senzoru a řídicí jednotka, na základě kterých se bude přístroj posouvat jak ve směru x, tak ve směru y. Posun v ose y je zde uveden pouze teoreticky pro ozkoušení navrženého systému bude použita jedna určitá nastavená vzdálenost.



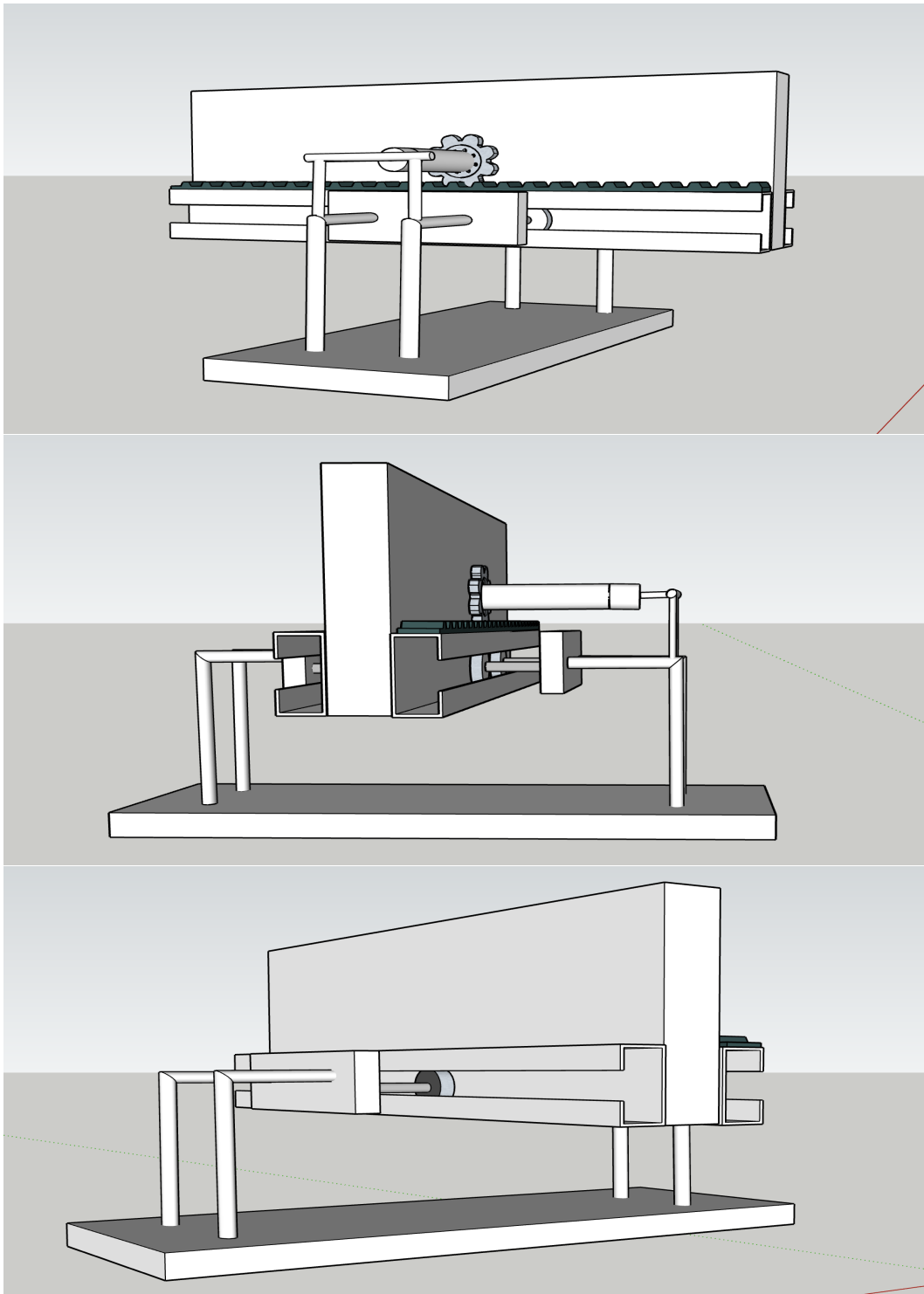
Obr. 5.3: Blokové schéma navrženého systému

5.2 Návrh konstrukce

Na obrázcích 5.4 a 5.5 jsou znázorněny 3D modely návrhu konstrukce. Na prvních snímcích je uvedena konstrukce pozemní, která se bude sestrojovat. Na druhých snímcích je uvedena závěsná konstrukce, která zde bude uvedena čistě jako návrh. Oba tyto návrhy byly vytvořeny v online programu Sketchup.



Obr. 5.4: Zjednodušený 3D návrh pozemní konstrukce z vícero úhlů



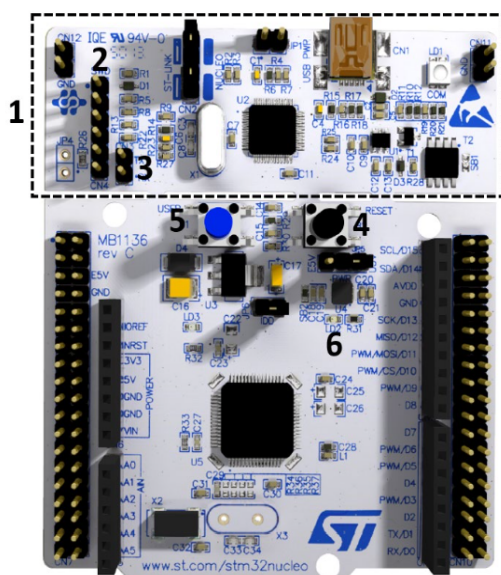
Obr. 5.5: Zjednodušený 3D návrh stropní konstrukce z vícero úhlů

5.3 Volba komponent

Pro sestavení konstrukce a nastavení systému byly zvoleny následující komponenty:

5.3.1 Řídící jednotka

Jako řídicí jednotka byl zvolen 32bitový mikrokontrolér STM32, který je možné vidět na obr. 5.6. Vývojová deska obsahuje programátor (1), konektor CN4, který slouží k programování kontrolerů mimo vývojovou desku (2), převodník USB na UART (3), tlačítko reset (4), uživatelské tlačítko (5) a integrovanou LED (6). Jádrem řídicí jednotky je ARM Cortex-M4F s maximální taktovací frekvencí 72 MHz. Vstupně/výstupní piny jsou jediným možným prostředkem, jak může čip komunikovat s okolím, dá se říci, že je to brána informací. Za každým pinem jsou umístěny dvě ochranné diody, pokud by bylo vstupní napětí vyšší než maximální povolené napětí dojde k průrazu ochranné diody, a tím dojde k samotné ochraně mikrokontroleru. Za diodami jsou umístěny pull-up a pull-down rezistory, které následně udávají logickou hodnotu. [27]



Obr. 5.6: Vývojová deska STM32 Nucleo, převzato z: [27]

5.3.2 Ultrazvukový senzor

Při konstrukci byl pro měření vzdálenosti využit ultrazvukový senzor HC-SR04 s detekční vzdáleností od 2 cm do 4 m a to s přesností 3 mm. Trigger vyšle do modulu 10 μ s signál, modul následně automaticky vyšle osm ultrazvukových 40 kHz pulzů

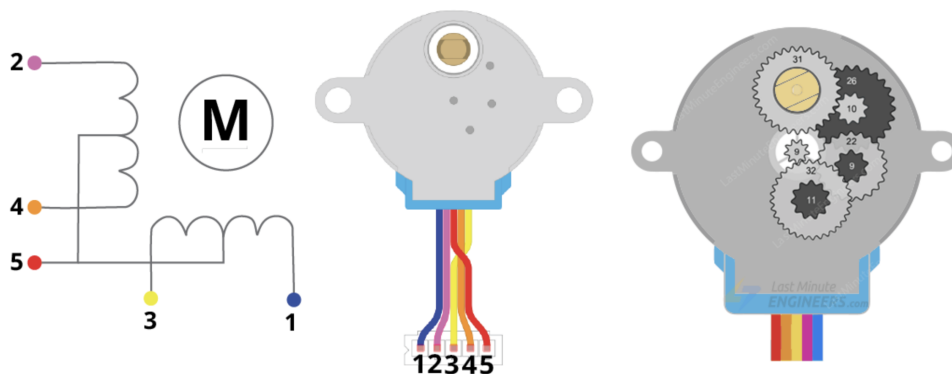
a následně čeká na odražený signál, ultrazvukový senzor a jeho průběh jsou zobrazeny na obr. 5.7. Rozdíl mezi vysláním pulzů a zpětnou detekcí je poté roven dvojnásobné časové vzdálenosti mezi senzorem a detekovaným objektem. Kromě vstupů Trig a Echo jsou zde ještě vstupy pro uzemnění a napájení, které je 5 V. [29]



Obr. 5.7: Modul ultrazvukového senzoru HC-SR04 (vlevo) a jeho časový průběh vysílání a přijímání impulzů (vpravo), převzato z: [29]

5.3.3 Pohon

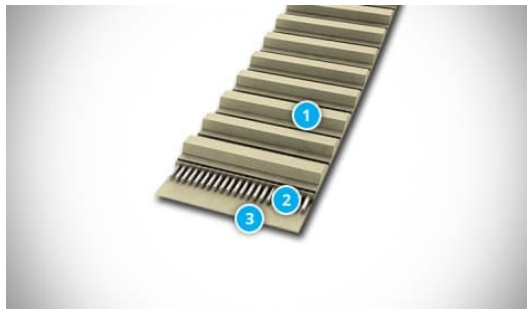
Pro ověření návrhu byl zvolen unipolární krokový motor s režimem celého kroku 28BYJ-48 s jmenovitým napětím 5 V. Jedna jeho otáčka odpovídá 32 krokům a jelikož má motor navíc redukční převod 1/64 existuje ve skutečnosti 2038 kroků na jednu otáčku. Motor je jednoduše ovladatelný a jeho pohyb vzniká díky přepínání 4 cívek, které tento motor obsahuje. Schéma zapojení jednotlivých cívek a tento motor jsou znázorněny na obr. 5.8. [7][20][22]



Obr. 5.8: Krokový motor 28BYJ-48, na levé straně je schéma zapojení jednotlivých cívek a napájení, kde jsou pod čísly 1-4 zamýšleny cívky a číslo 5 značí napájení, převzato z: [7] a na pravé na pravé straně jsou zobrazeny převody, převzato z: [20]

Dále bylo využito kolečko s 12 zuby a HTD 3M - 9 polyuretanový ozubený řemen profilu HTD v metráži, který je široký 9 mm a je ukázán na obr. 5.9. Základ tohoto

řemene je tvořen ocelovým tažným vláknem (ve speciálních případech kevlarovým nebo nerezovým). Hřbet řemenu stejně jako zuby jsou vyrobeny z termoplastického polyuretanu, který má vysokou rozměrovou stálost a odolnost proti opotřebení.



Obr. 5.9: Konstrukce řemenu: 1. Zuby z polyuretanu 2. Ocelová tažná vlákna 3. Hřeben z polyuretanu, převzato z: [22]

5.3.4 Ukončující tlačítko

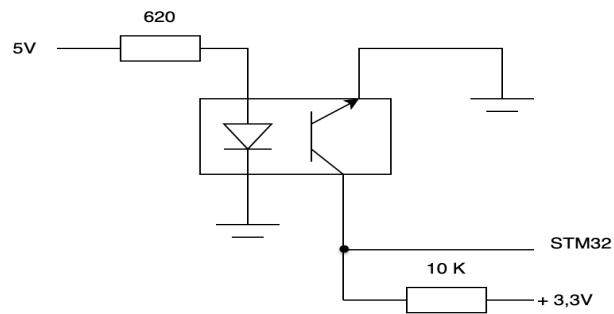
Tento komponent je konstruován zapojením pull-up rezistoru, kde byl vybrán odpor 10 k Ω . Rezistor je zapojen na nepájivém poli a pomocí kabeláže připojen k řídicí jednotce. Schéma zapojení tohoto pull-up rezistoru je uvedeno na obr. 5.11.

5.3.5 LED

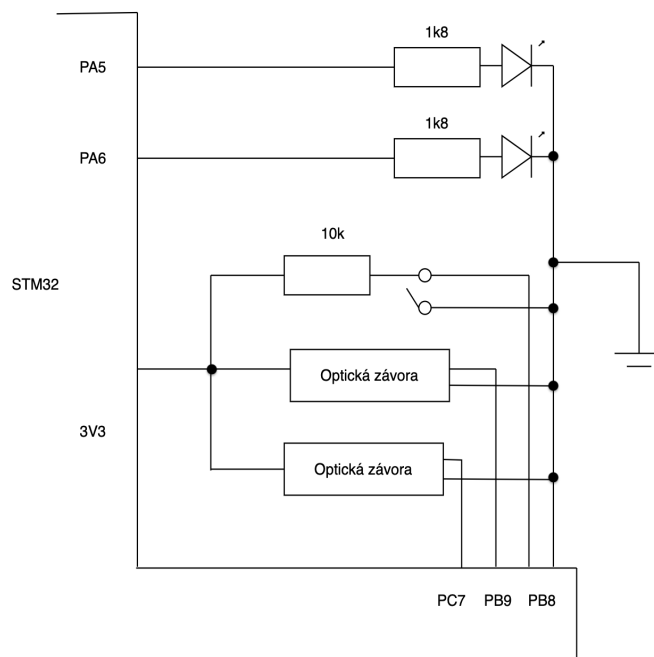
Pro signalizaci vypnutého či zapnutého systému byly využity LED. Pro zapnutý stav slouží LED zelené barvy a pro vypnutý stav slouží LED s červenou barvou. LED byly zapojeny dle schématu na obr. 5.11, kde je patrné celkové schéma zapojení k STM32.

5.3.6 Optická závora

V systému jsou využity hned dvě optické závory. Použité optické závory jsou závory LTH301-07. Optická závora na konci dráhy je velmi důležitou součástí konstrukce, jelikož z velké většiny díky ní dochází k ukončení snímání (měření). Díky optické závoře se tedy nemůže stát, že by vozík chtěl pokračovat v pohybu po ose x, a tím pádem by vyjel ze své dráhy. K tomu slouží primární hardwarová podmínka s využitím optické závory. Druhá optická závora je umístěna na začátku dráhy a slouží pro návratovou funkci, tj. pokud dojde k ukončení systému, přejede vozík na začátek dráhy, který je signalizován právě touto závorou. Schéma zapojení optické závory je znázorněno na obr. 5.10.



Obr. 5.10: Schéma zapojení optické závory



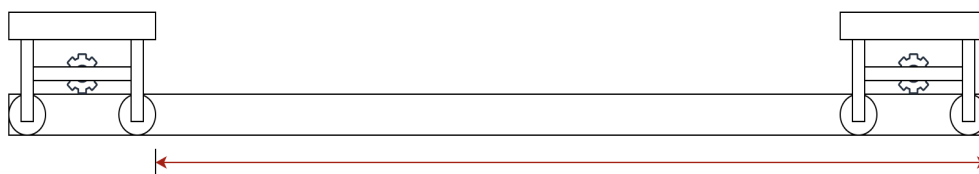
Obr. 5.11: Celkové schéma zapojení na nepájivém poli k vývojové desce STM32. V horní části se nacházejí optická závora, která značí začátek dráhy. LED signalizace a ve spodní části zapojení pull-up rezistoru a optické závory, na konci dráhy.

5.4 Software

Pro vytvoření vývojového diagramu je nejprve zapotřebí stanovení jednotlivých inicializačních podmínek, které musejí být na začátku splněny. Z těchto podmínek poté budeme vycházet při tvorbě samotného vývojového diagramu.

Seznam podmínek pro inicializační nastavení včetně jejich důležitosti:

- Maximální délka trasy: Je zapotřebí brát v potaz délku trasy, aby vozík nevyjel mimo dráhu, v praxi řešeno pomocí optických závor, viz obr. 5.12.



Obr. 5.12: Inicializační podmínka č. 1

- Úvodní pozice: Nastavení úvodní pozice tak, aby vždy když bude algoritmus spuštěn se pojezdový vozík nacházel na začátku dráhy (pásu) viz obr. 5.13.



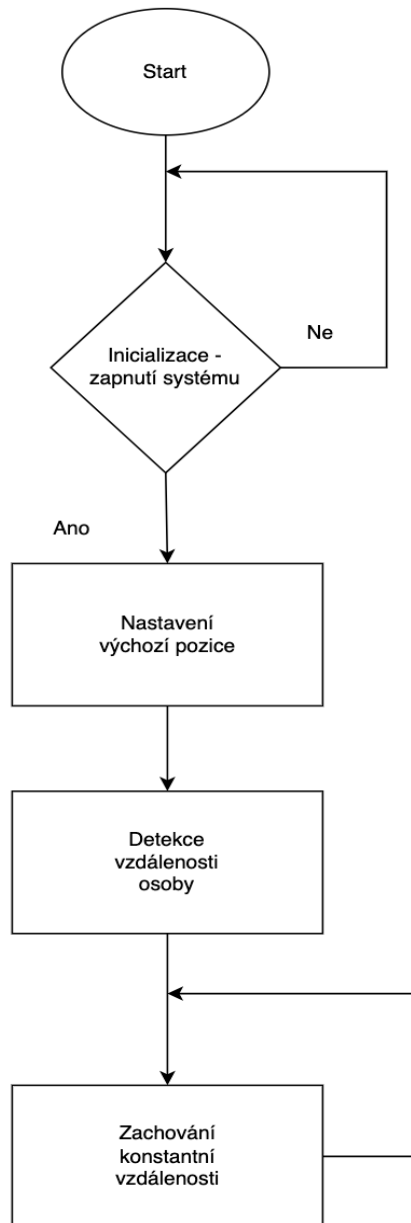
Obr. 5.13: Inicializační podmínka č. 2

- Kontrola detekce objektu/člověka: Detekce osoby/objektu je třetí podmínkou, následně může začít sledování vzdálenosti. Tato detekce je zobrazena na obr. 5.14. Tato detekce osoby/objektu je zde pouze naznačena, při konstrukci a ověření systému bude pevně nastavená vzdálenost.

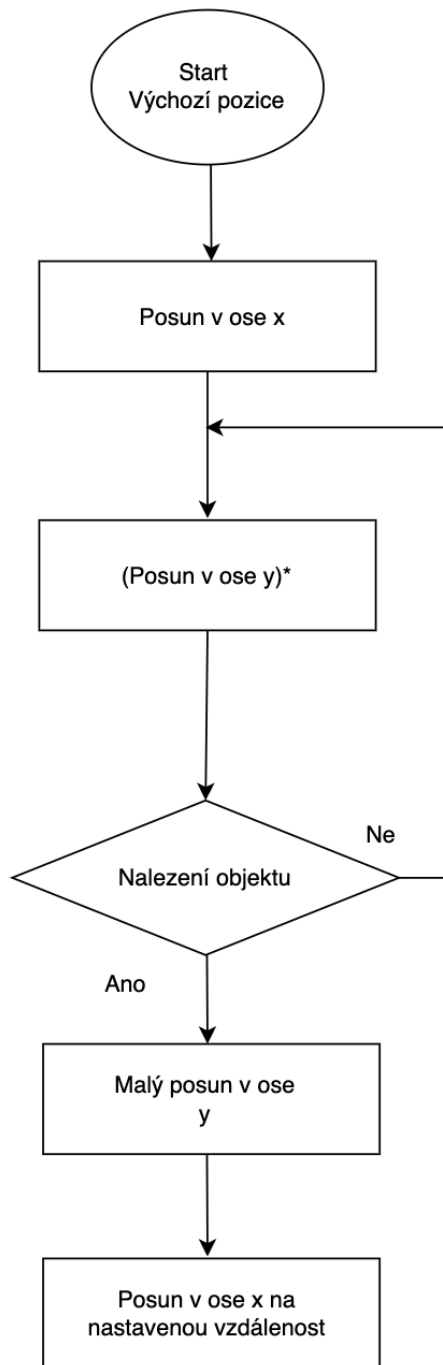


Obr. 5.14: Inicializační podmínka č. 3

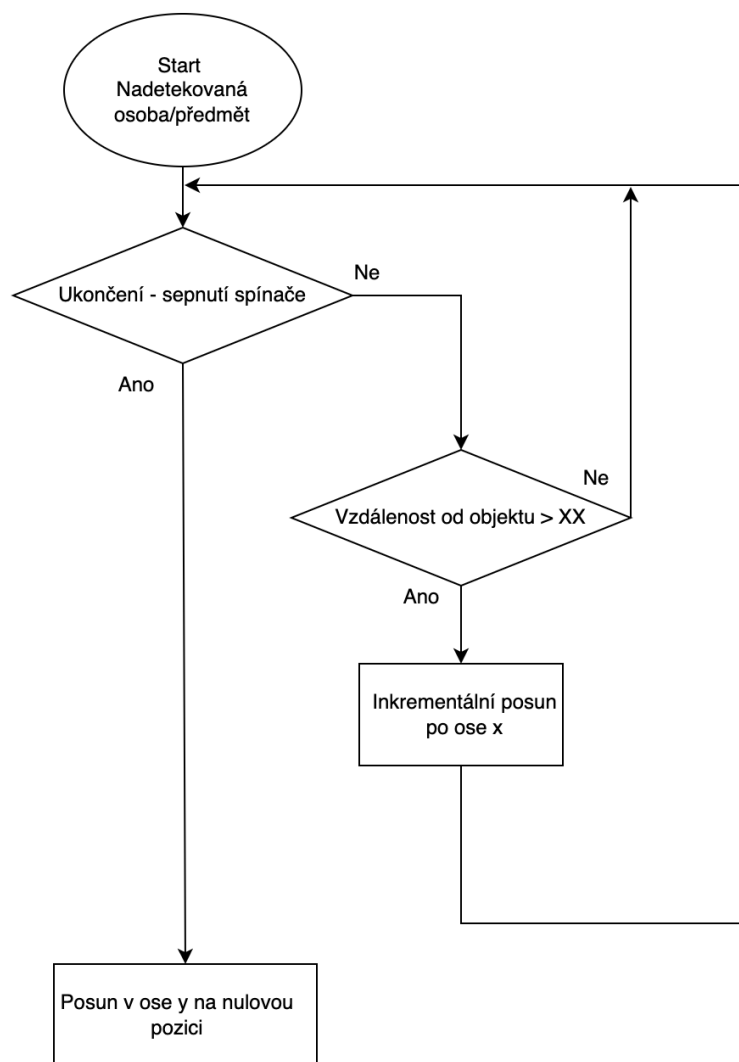
Na obrázku č. 5.15 je zobrazen obecný vývojový diagram, který se skládá ze tří částí. První částí je inicializace a nastavení výchozí pozice. Druhou částí se volá funkce detekce osoby, která tedy je zde pouze v navržené podobě, v reálu je systém otestován na pevně dané vzdálenosti. Třetí částí je funkce zachování vzdálenosti. Tyto dvě funkce jsou zobrazeny na následujících vývojových diagramech. V tomto případě se detekce osoby rovná detekci objektu.



Obr. 5.15: Obecný vývojový diagram, který volá dvě funkce: Detekci osoby a zachování vzdálenosti

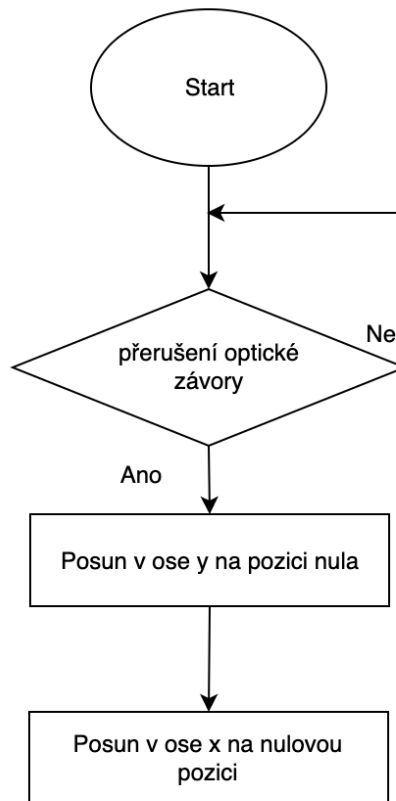


Obr. 5.16: Vývojový diagram detekce objektu, posun v ose y není součástí zadání, je zde brán pouze teoreticky



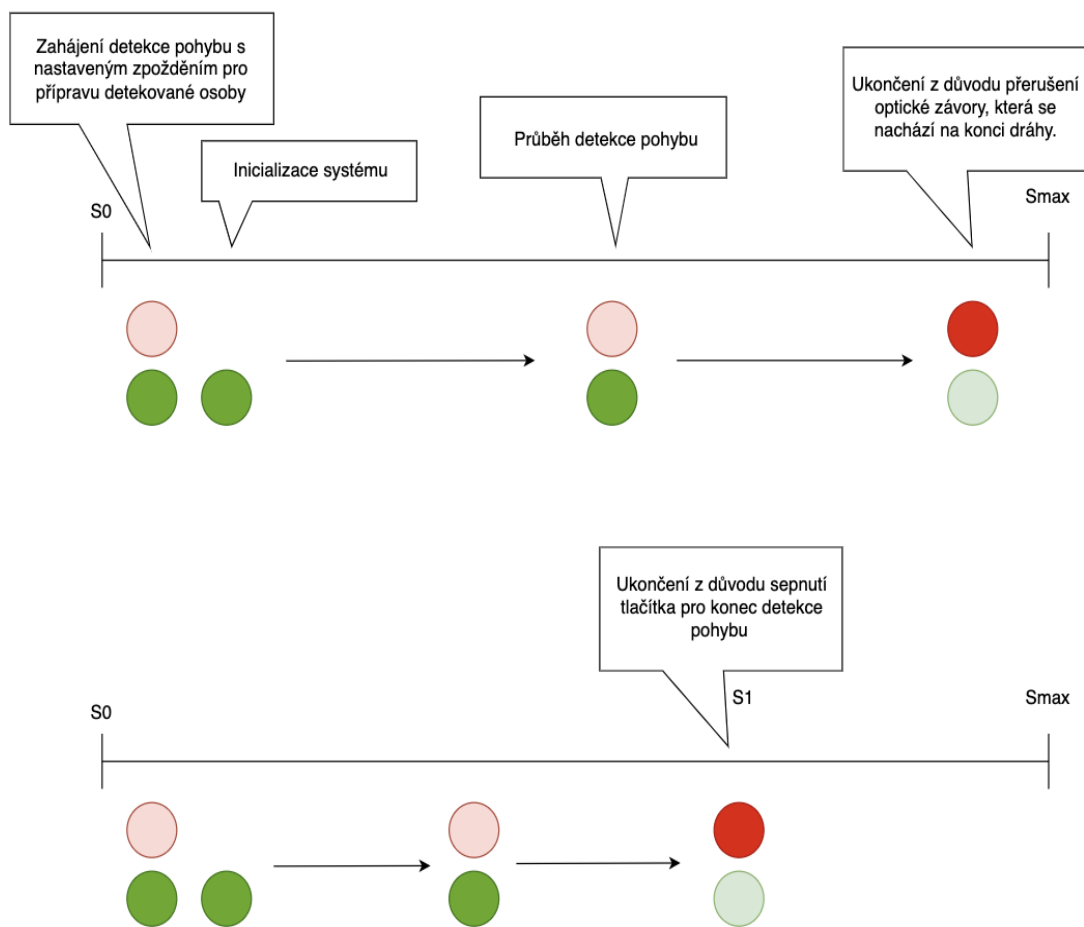
Obr. 5.17: Vývojový diagram zachování vzdálenosti

Program bude ukončen dvěma způsoby, prvním z nich je stlačení tlačítka pro ukončení a druhým je přerušení optické závory na konci dráhy. Toto přerušení je primární hardwarovou podmínkou celého systému. Jakmile dojde k tomuto přerušení, vozík by byl posunut v ose y na pozici 0, poté dojde k návratu na začátek dráhy. Princip funkce optické závory je možné vidět na obr. vývojového diagramu 5.18.



Obr. 5.18: Primární hardwarová podmínka optické závory

Pro snazší pochopení je na obr. 5.19 znázorněn zjednodušený průběh detekce pohybu. V horní části obrázku je znázorněn průběh detekce, která je ukončena primární podmínkou, tedy je ukončena pomocí přerušení optické závory. Ve druhém případě (spodní část obrázku) je detekce ukončena v průběhu měření za pomoci tlačítka. V obou případech nastává na začátku zahájení detekce určité zpoždění, které slouží spíše pro přípravu detekované osoby/objektu. Po nastavení krátkého zpoždění nastává inicializace systému, která sama o sobě může trvat určitou chvíli. Poté probíhá samotná detekce pohybu ve směru osy x a to až do chvíle, kdy dojde k jejímu ukončení.



Obr. 5.19: Zjednodušeně naznačený průběh detekce pohybu

STM32CubeIDE a řízení systému

Jako řídicí jednotka byl vybrán mikrokontrolér STM32F303RE. Tento mikrokontrolér byl nastaven v programu STM32CubeIDE, kde byl programovacím jazykem zvolen jazyk C. Byly nastaveny jednotlivé piny na vývojové desce. Piny byly nastaveny jako vstupní, či výstupní a přejmenovány. Tento krok se ukázal jako velmi výhodný, jelikož se později mohlo pracovat s přejmenovanými názvy, což bylo přehlednější a jednodušší jelikož díky tomu byly piny automaticky nastaveny viz obr 5.20.

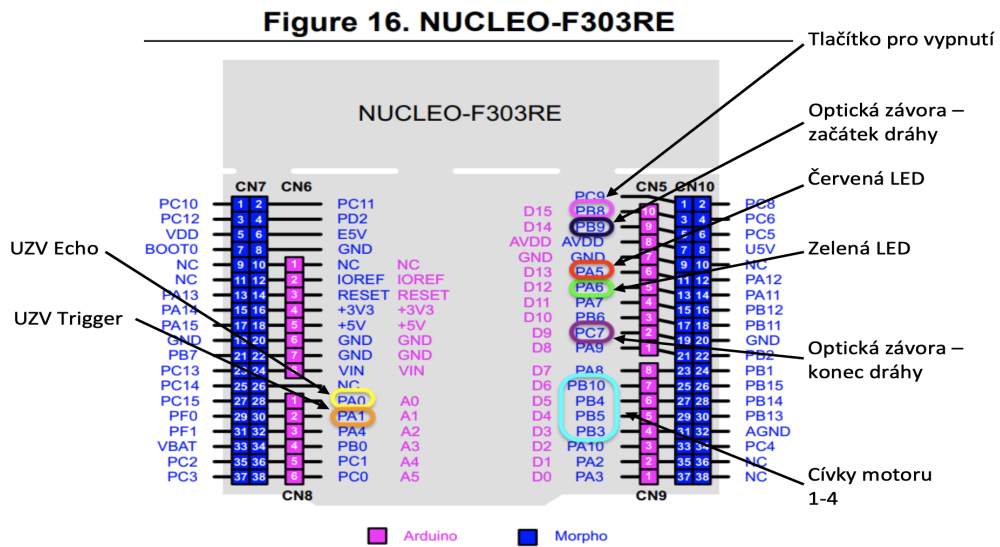
The image shows the Configuration window in STM32CubeIDE, specifically the GPIO configuration for the STM32F303RETx. The window is titled 'Configuration' and has a dropdown menu set to 'Group By Peripherals'. Below this, there are tabs for 'GPIO', 'RCC', 'SYS', and 'NVIC', with 'GPIO' selected. A search bar for signals is present, along with a checkbox for 'Show only Modified Pins'. A table lists the configured pins with their signal names, GPIO configurations, and user-defined names.

Pin...	Signal...	GPIO ...	GPIO ...	GPIO ...	Maxi...	Fast ...	User L...	Modif...
PA0	n/a	n/a	Input ...	No pu...	n/a	n/a	UZV_E...	✓
PA1	n/a	Low	Outpu...	No pu...	Low	n/a	UZV_...	✓
PA5	n/a	Low	Outpu...	No pu...	Low	n/a	LED_R...	✓
PA6	n/a	Low	Outpu...	No pu...	Low	n/a	LED_...	✓
PB3	n/a	Low	Outpu...	No pu...	Low	n/a	Civka4	✓
PB4	n/a	Low	Outpu...	No pu...	Low	n/a	Civka2	✓
PB5	n/a	Low	Outpu...	No pu...	Low	n/a	Civka3	✓
PB8	n/a	n/a	Exter...	No pu...	n/a	n/a		✓
PB9	n/a	n/a	Exter...	No pu...	n/a	n/a		✓
PB10	n/a	Low	Outpu...	No pu...	Low	n/a	Civka1	✓
PC7	n/a	n/a	Exter...	No pu...	n/a	n/a		✓

Below the configuration window is a pinout diagram of the STM32F303RETx LQFP64 microcontroller. The diagram shows the physical pins and their corresponding configurations. The pins are color-coded: green for user-defined signals, yellow for standard signals, and grey for unconfigured pins. The diagram includes labels for various pins such as VDD, VSS, PA0, PA1, PA2, PA3, PA4, PA5, PA6, PA7, PA8, PA9, PA10, PA11, PA12, PA13, PA14, PA15, PB1, PB2, PB3, PB4, PB5, PB6, PB7, PB8, PB9, PB10, PB11, PB12, PB13, PB14, PB15, PC1, PC2, PC3, PC4, PC5, PC6, PC7, PC8, PC9, PC10, PC11, PC12, PC13, PC14, PC15, VDDA, NRST, PFC0, PFC1, RCC_OSC_IN, RCC_OSC_OUT, VBAT, LED_RED, LED_GREEN, Civka1, Civka2, Civka3, Civka4, SYS_JTCK-SWCLK, SYS_JTMS-S, and GPIO_EXTI7.

Obr. 5.20: Nastavení a přejmenování jednotlivých pinů v programu STM32CubeIDE

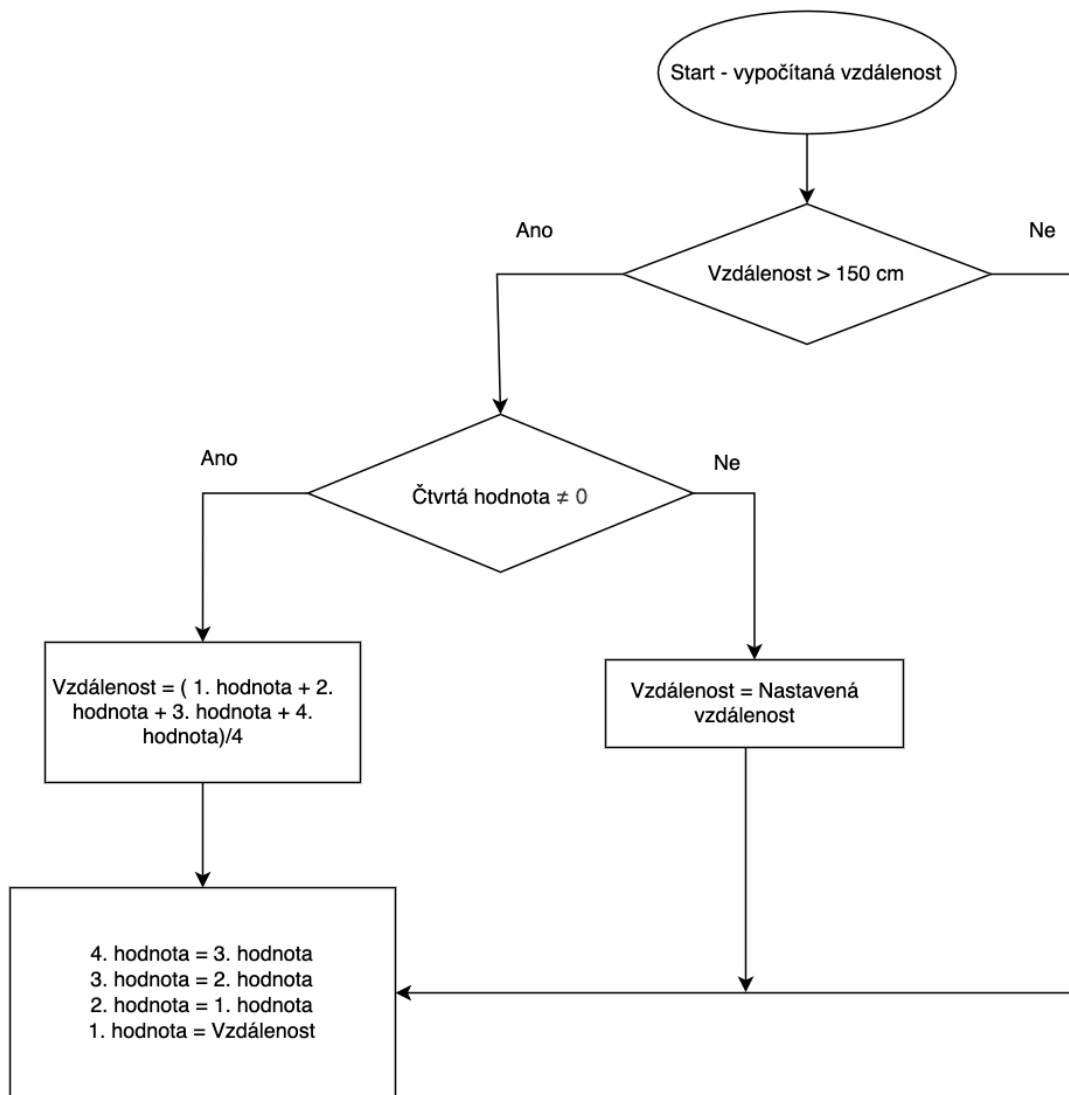
Zapojení jednotlivých pinů STM32F303RE na samotné vývojové desce Nucleo je znázorněno na obr. 5.21.



Obr. 5.21: Zapojení jednotlivých pinů komponent na piny na vývojové desce STM32F303RE

V části Core Src. byl napsán za pomoci knihovny HAL hlavní kód. Nejprve se nastavily inicializační a ukončující podmínky, tedy došlo k nastavení pull-up rezistorů a optické závory, poté v nekonečné smyčce while probíhá samotný program, kde pomocí spínání pinů ultrazvukového senzoru dochází k výpočtu vzdálenosti a na základě tohoto nastavení jednotlivých pinů krokového motoru.

Při řízení ultrazvukového senzoru byl na vstupní pin přiveden signál, který vyšle osm ultrazvukových pulzů. Poté co se pulzy odrazí od detekované osoby/objektu se šíří směrem zpět a je detekován přijímačem a putuje na pin Echo. Dvojnásobná vzdálenost tedy odpovídá časovému intervalu mezi registrací signálu na pinu Trig a Echo. Jelikož ultrazvukový senzor občas vygeneruje špatnou vybočující hodnotu vzdálenosti, bylo v programu vytvořeno opatření, aby pokud tato situace nastane, byla vybočující hodnota nahrazena průměrnou hodnotou ze čtyř předchozích naměřených vzdáleností viz 5.22 na straně 52.



Obr. 5.22: Vývojový diagram pro ošetření mimořádně chybné hodnoty vzdálenosti

Řadič krokového motoru je připojen k vývojové desce pomocí šesti vodičů. Čtyři z těchto vodičů představují budiče jednotlivých cívek, které se spínají viz tabulka č. 5.1, následující dva vodiče představují napájení a uzemnění.

Tab. 5.1: Spínání cívek ve směru pohybu dopředu

Krok	A	B	C	D
Cívka 1	1	0	0	1
Cívka 2	1	1	0	0
Cívka 3	0	1	1	0
Cívka 4	0	0	1	1

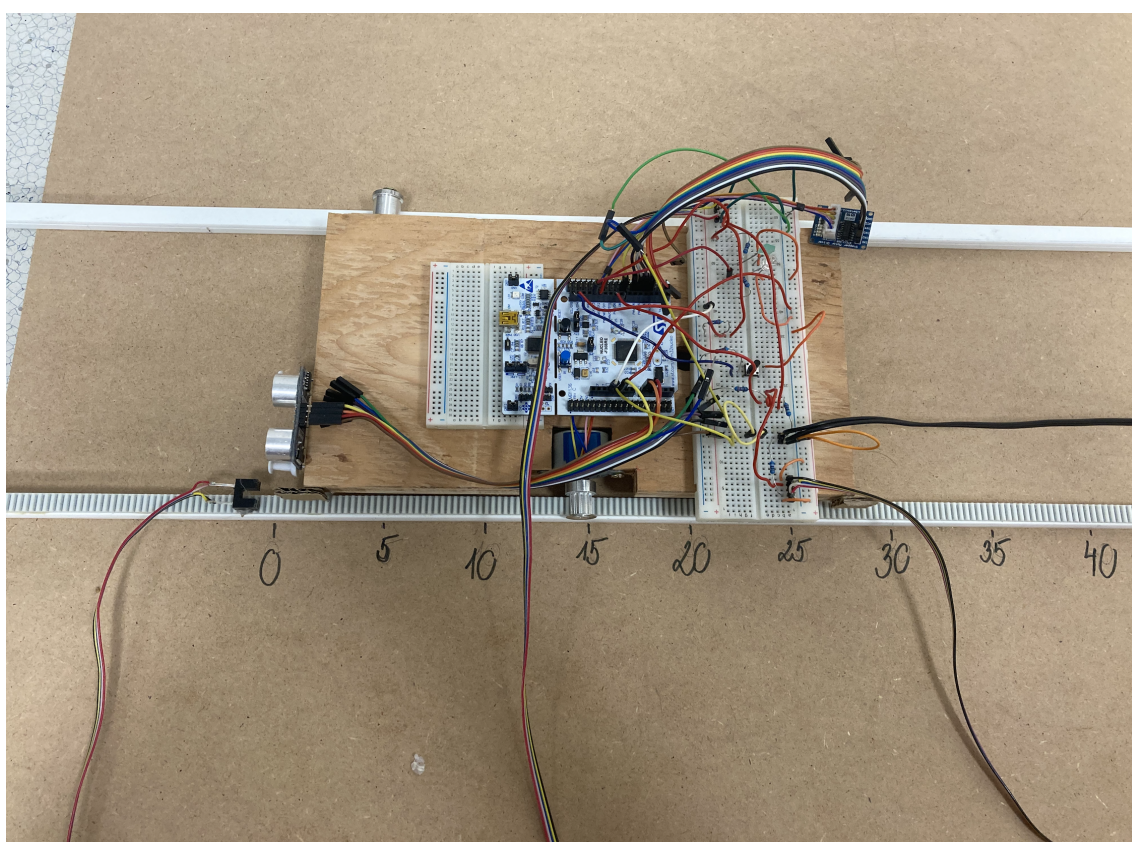
Tab. 5.2: Spínání cívek ve směru pohybu dozadu

Krok	A	B	C	D
Cívka 1	0	0	1	1
Cívka 2	0	1	1	0
Cívka 3	1	1	0	0
Cívka 4	1	0	0	1

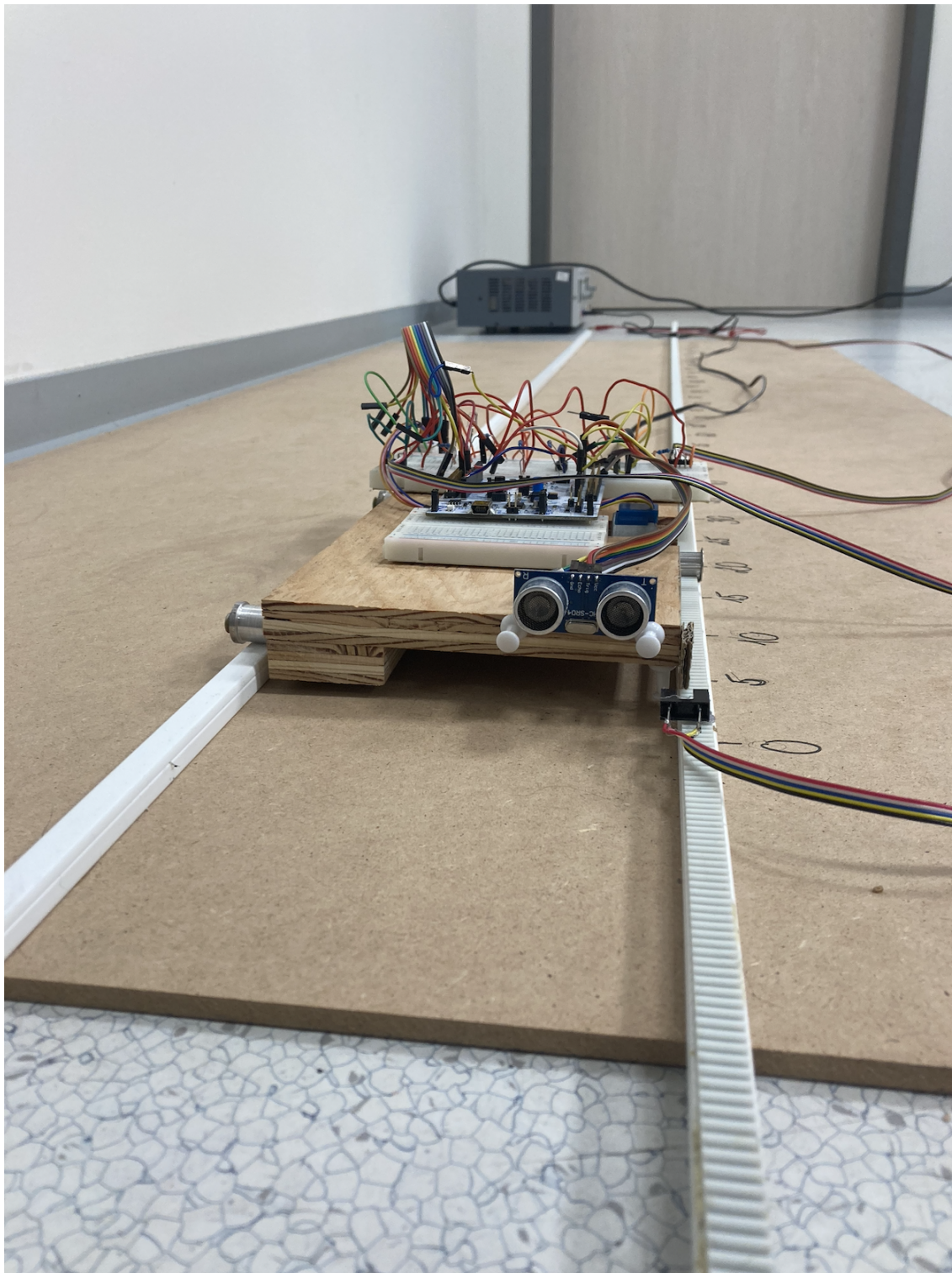
Dle tabulky č. 5.2 se pohybuje motor v případě že se osoba, či objekt přiblížil na vzdálenost, která je menší než nastavená vzdálenost, tedy na 50 cm. V případě, že je program ukončen, tj. došlo k přerušení optické závory či sepnutí ukončujícího tlačítka, dojde k návratu vozíku na původní pozici. Tedy i zde dojde k nastavení jednotlivých cívek krokového motoru dle tabulky č. 5.2. Před samotným návratem do původní pozice by měl nejdříve předcházet posun v ose y do pozice 0, pro otestování systému ovšem tento směr zanedbáváme a je zde znázorněn pouze teoreticky. Toto ukončení je v programu vytvořeno pomocí tzv. interruptů, tedy přerušení, které není nijak závislé na smyčce while, tudíž nezpomaluje detekci ani pohyb vozíku.

5.5 Konstrukce

Finální konstrukce byla vytvořena pomocí dvou kolejnic, na jedné z těchto kolejnic je umístěn vybraný 9 mm ozubený řemen. Po těchto kolejnicích se pohybuje pomocí tří koleček, resp. dvou koleček a jednoho ozubeného kola, vozík. Na obou koncích kolejnice s ozubeným řemenem jsou umístěny optické závory. Tento vozík byl tedy postaven pomocí tří kol pro jeho lepší stabilitu a desky, na které je umístěn především ultrazvukový senzor, který sleduje vzdálenost. Od původního 3D modelu návrhu konstrukce se tato finální sestavená konstrukce trochu liší. Na následujících obrázcích 5.23, 5.24 je zobrazena finální sestavená konstrukce v laboratoři ústavu biomedicínského inženýrství.



Obr. 5.23: Finální konstrukce pro ověření funkčnosti, přibližný pohled shora



Obr. 5.24: Finální konstrukce pro ověření funkčnosti, přibližný pohled zepředu

6 Diskuze

V diplomové práci byl pro bezkontaktní detekci vzdálenosti zvolen ultrazvukový senzor, který pracuje na principu vytváření UZV vlny a následné detekce její ozvěny (tzv. echa). V porovnání s dalšími způsoby bezkontaktního měření vzdálenosti stojí za zmínku určení vzdálenosti pomocí radiových vln, které je v dnešní době též hojně používáno, ovšem je finančně nákladnější oproti ultrazvukovému senzoru. Jako pohon byl vybrán krokový motor pro svoji jednoduchost a přesnost. Krokový motor, přestože patří mezi rotační motory, v kombinaci s jiným druhem mechanismu (např. lineárním ozubeným hřebenem) vytváří lineární pohyb.

Nejprve byla ověřena funkčnost jednotlivých komponent zvlášť. Nejprve byl sestaven program pro měření vzdálenosti pomocí ultrazvukového senzoru HC-SR04. V tomto programu byla po levé straně sledovatelná vzdálenost v cm a porovnávána s právítkem zda je tato informace správná. Poté byl naprogramován motor 28BYJ-48 a jeho nastavení cívek, pomocí tlačítka na vývojové desce byl ověřen jeho pohyb oběma směry, tj. pro ověření správného nastavení bylo využito tlačítka, které pokud bylo sepnuté, pohyboval se motor jedním směrem a pokud ne, pohyboval se směrem druhým.

Po ověření obou těchto funkčních programů byl vytvořen program, který kombinoval ultrazvukový senzor a motor. Motor a směr jeho rotace byl řízen informacemi o vzdálenosti z ultrazvukového senzoru. Nastavená vzdálenost vozíku od objektu byla stanovena na 50 cm, v případě, že byla pomocí ultrazvukového senzoru naměřená vzdálenost menší než vzdálenost nastavená, tj. objekt se posunul blíže k senzoru, bude se vozík (motor) pohybovat směrem dopředu. Pokud by byla vzdálenost rovna 50 cm motor se zastaví tím, že dojde k vyresetování¹ všech jeho cívek. Kdyby nastala situace, že se objekt posunul směrem dozadu, tak v tomto případě by měl motor zareagovat stejně a též se pohnout směrem dozadu. Takto nastavený směr pohybu se choval dle očekávání.

Sloučený program ultrazvukového senzoru a motoru byl na základě výsledků testování měření vzdálenosti rozšířen o ošetření hodnot vzdáleností, kdy ultrazvukový senzor mimořádně vrátí hodnotu vzdálenosti, která neodpovídá reálnému měření a je na rozdíl od ostatních hodnot mnohem vyšší — je třeba tuto chybovou hodnotu detekovat a opravit. Proto byla vždy každá hodnota porovnávána a v případě, že se lišila o víc jak 100 cm, byla tato hodnota jako mimořádná nahrazena průměrnou hodnotou ze čtyř předchozích naměřených vzdáleností, dá se říci, že se jedná o průměrování hodnot pomocí klouzavého okna čtyř posledních měření. V případě, že by chybová hodnota nastala už při prvních čtyřech měření, tady by nebylo možné,

¹Pojmem *vyresetování cívek* je z pohledu signálového řízení myšleno, že signály řadiče motoru jsou nastaveny na log. 0. Tím dojde k zastavení a fixaci krokového motoru v dané poloze.

jak nahradit tuto hodnotu za průměrnou hodnotu jak bylo uvedeno výše, bude tato chybová hodnota přepsána na nastavenou vzdálenost 50 cm a nedojde k pohybu motoru.

Zařízení je plně automatické. Jak zapnutí, tak i vypnutí přístroje bylo řešeno pomocí tzv. přerušení (interrupt), tedy primární podmínky, která není závislá na nekonečné smyčce while. Ukončení bylo vyřešeno dvěma způsoby. Prvním řešením ukončení je pomocí stisknutí vypínacího tlačítka, které je konstrukčně řešeno zapojením pull-up rezistoru, k tomuto ukončení může dojít kdykoliv v průběhu detekce. Druhý způsob ukončení je využití optické závory, která se nachází na konci dráhy. V případě ukončení monitorování, se vozík vrací na začátek dráhy, to je řešeno pomocí druhé optické závory. V případě přerušení optické dráhy na začátku dojde k ukončení celého programu. Zapínání přístroje je řešeno pomocí *reset* tlačítka umístěného na mikrokontroléru STM32.

Celkově byl přístroj dle zadání diplomové práce řešen pouze po ose x, což bylo provedeno tak, že byla jasně nastavená vzdálenost, ve které se objekt detekoval, tudíž nemuselo docházet k jeho detekci. V práci i v kódu je ovšem naznačen postup při řešení pohybu v ose y, jak by tento posun vypadal a kdy přesně by v kódu probíhal. Posun v ose y je znázorněn i na vývojovém diagramu navrženého systému.

Při řešení práce nastal největší problém při sestavování softwaru u volby nastavení jednotlivých pinů. Vznikla potřeba v některých případech zvolit různé vstupně/výstupní brány, např. brány cívek motoru a pinů z ultrazvukového senzoru musí být různé, z dokumentace STM32 (zdroj [24]) bylo zjištěno, že mikrokontrolér neumožňuje ve stejném čase dva naprosto odlišné způsoby použití totožné brány, které jsou vzájemně nekompatibilní (např. současné vysílání UZV, detekci echa a řízení cívek motoru). Z tohoto důvodu je ultrazvukový senzor zapojen k pinům brány A, zatímco jednotlivé cívky motoru jsou zapojeny na piny brány B.

Dalším problémem bylo zapojení přerušení, která musela být aktivována pro piny s různým číslováním, než bylo použito viz obr. 5.21 na str. 51, kde je zobrazeno zapojení jednotlivých pinů. Přerušení v tomto schématu představují:

- optická závora pro detekci začátku dráhy, vstup B9
- optická závora pro detekci konce dráhy, vstup C7
- tlačítko pro vypnutí běhu programu, vstup B8.

Tyto vstupní piny byly vybrány z toho důvodu, že čísla 7, 8 a 9 nenesou žádné jiné využití piny, pokud přijde impuls z pinu, který nese toto očíslování, je to pouze z přerušení.

Zadání práce požadovalo rychlost pohybu vozíku do 1,5 m/s. Vzhledem k tomu, že testování probíhalo v laboratoři na krátkém modelu (délka hřebene 2 m), byl po domluvě s vedoucím práce použit pomalejší krokový motor a jemnější krok ozubeného hřebenu. Původní realizace předpokládala testování v laboratoři s min. 6me-

trovou délkou pojezdu. Požadované rychlosti by bylo možné dosáhnout rychlejším krokovým motorem (současný krokový motor je převodován na 2038 kroků na jednu otáčku viz 5.8 na str. 41).

Závěr

Zadáním diplomové práce bylo navrhnout zařízení, které sleduje pohyb objektu bezkontaktním měřením jeho vzdálenosti. Pro detekci pohybu byly využity informace o aktuální vzdálenosti získané pomocí ultrazvukového senzoru. Realizované zařízení je schopno udržovat konstantní, uživatelem definovanou vzdálenost (zde 50 cm) s respektováním směru pohybu detekovaného objektu. Pokud je vzdálenost detekovaného objektu od vozíku menší, vozík je lineárním pohonem posunut dopředu a naopak, pokud byla vzdálenost větší, vrátil se vozík dozadu na zadanou vzdálenost. Zadání práce předpokládá pohyb objektu v jedné ose, ve které je řešen lineární pohon. Ultrazvukový senzor má detekční úhel 15° , což umožňuje ve vzdálenosti 50 cm detekovat s možným rozptylem do 26 cm (± 13 cm od osy pohonu).

První část práce byla zaměřena na teoretický úvod daného úkolu. V první kapitole byl vysvětlen především princip a využití ultrazvukových senzorů. V následující kapitole byly uvedeny jiné způsoby bezkontaktního měření vzdálenosti, z nichž v porovnání s ultrazvukovým senzorem stojí za zmínku především určení vzdálenosti pomocí radiových vln. Následující kapitola je věnována lineárním pohonům (lineárním a krokovým motorům) a jeho principu a konstrukci. Dále jsou zde uvedeny různé typy lineárních pohonů pro zdůvodnění následného výběru. Nejvíce je popsán motor krokový, jelikož do následné konstrukce byl vybrán právě tento typ motoru.

Praktická část se věnuje systémovému návrhu a konstrukci finálního zařízení. Je zde popsána především řídicí jednotka STM32 a její nastavení pro řízení systému. V systémovém návrhu jsou zobrazeny vývojové diagramy, podle kterých jsou sestaveny řídicí programy, a nastavení ve vývojovém prostředí STM32CubeIDE. Byl vytvořen i 3D návrh možné konstrukce, jak stropní, tak i pozemní. Ke konstrukci jsou uvedeny jednotlivé komponenty, ze kterých se zařízení skládá a jejich schéma zapojení. Konstrukce pro ověření funkce návrhu je sestrojena na dvou kolejnicích, přičemž jedna měla polyuretanový ozubený hřeben pro lineární pohon ozubenou řemenicí. Konstrukce obsahuje též optické brány pro začátek a konec dráhy.

Ověření realizovaného návrhu prokázalo, že sestavený software je plně funkční, zařízení se pohybuje dle předpokladu a zadání pouze s rozdílnou rychlostí (viz závěr diskuze). Realizované zařízení je tak funkční a splnilo požadavky zadání. V případě budoucí realizace zavěšením na stropní konstrukci je možné plně využít sestavený software i koncept pohonu.

Literatura

- [1] Advantages of Ultrasonic sensor | Disadvantages of Ultrasonic sensor [online]. [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/Advantages-and-disadvantages-of-Ultrasonic-Sensor.html>
- [2] Analog | Embedded processing | Semiconductor company | TI.com [online]. Copyright © [cit. 20.06.2021]. Dostupné z: https://www.ti.com/lit/an/slaa907c/slaa907c.pdf?ts=1612687005840&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F
- [3] Aplikace radarů [online]. [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: https://www.army.cz/images/id_8001_9000/8753/radar/k31.htm
- [4] Automatizace.hw.cz, rady a poslední novinky z oboru [online]. [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/komponenty-mereni-a-regulace/bezkontaktni-kapacitni-senzory-priblizeni-obecny-popis.html>
- [5] AUTOSEN-Senzory, automatizační technologie a řešení pro Průmysl 4.0. [online]. [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: <https://autosen.com/cs/odbornost-indukcni-senzory>
- [6] BARRETT, Jack, Tim HARNED a Jim MONNICH. Linear motor basics. In: Parker Hannifin Corporation [online]. [cit. 2021-07-05]. Dostupné z: <http://www.parkermotion.com/whitepages/linearmotorarticle.pdf>
- [7] ESP32 Stepper Motor (28BYJ-48 and ULN2003 Driver) | Random Nerd Tutorials. Random Nerd Tutorials | Learn ESP32, ESP8266, Arduino, and Raspberry Pi [online]. Copyright © 2013 [cit. 13.05.2022]. Dostupné z: <https://randomnerdtutorials.com/esp32-stepper-motor-28byj-48-uln2003/>
- [8] HaydonKerkPittman: Stepper Motor Theory [online]. [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: <https://www.haydonkerkpittman.com/learningzone/technicaldocuments/stepper-motor-theory>
- [9] H2W-Innovation in Linear Motion: Linear Motor: How It Works? [online]. [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: https://www.h2wtech.com/blog/linear-motor-how-it-works?gclid=CjwKCAjw8KmLBhB8EiwAQbqNoHswDS5SY56BkQIUdFF_PJwvrCMAbVl17gxFfrcRNdTbTLeHv1bKl1xoCxpQQAuD_BwE

- [10] KAZELLE, Jiří, et al. Elektrotechnické materiály a výrobní procesy. VUT Brno: [s.n.], 2002. 143 s
- [11] Krokové motory [online]. In: . [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/105446759-Krokove-motory-vyhody-krokovych-motoru-a-jejich-nevyhody.html>
- [12] Krokový motor – princip [online]. [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: <https://www.mylms.cz/krokovy-motor-princip/>
- [13] Lineární motory [online]. [cit. 2022-01-06]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/806>
- [14] Main Difference Between Synchronous and Asynchronous Motor. Electrical Technology | All About Electrical Electronics Engineering [online]. Copyright © Copyright 2020, All Rights Reserved 2012 [cit. 03.09.2021]. Dostupné z: <https://www.electricaltechnology.org/2020/09/difference-synchronous-asynchronous-motor.html>
- [15] MARTINEK, Radislav. Senzory v průmyslové praxi. Praha: BEN - technická literatura, 2004. ISBN 80-730-0114-4.
- [16] Moog Brno-home CZ [online]. Copyright © [cit. 12.07.2021]. Dostupné z: http://www.moogbrno.cz/mt-content/uploads/2017/09/cz_lin-obecne_020909.pdf
- [17] Navrátil, L., Rosina, J. a kol.: Medicínská biofyzika. Praha:Grada Publishing, 2005.
- [18] Nippon Pulse America, Inc: Linear Motor Systems: Iron Core, U-Channel, and Tubular Linear Motors [online]. [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: <https://www.nipponpulse.com/learning/white-papers/linear-motor-systems-iron-core-u-channel-and->
- [19] Odborné časopisy [online]. Copyright © [cit. 12.07.2021]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/43687.pdf>
- [20] Ovládání 28BYJ-48 krokového motoru s ovladačem ULN2003 a Arduino [online]. [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://lastminuteengineers.com/28byj48-stepper-motor-arduino-tutorial/>
- [21] Optické zenzory pro měření vzdálenosti [online]. [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: http://home.zcu.cz/~formanek/mmvyuka/Data/opticke_snimace/optika_vzdalenost.htm

- [22] Ozubený řemen v metráži HTD 3M - 9 | TYMA CZ. TYMA CZ | Klínové, ozubené řemeny a řemenice, řetězy, spojky [online]. Copyright © 2004 [cit. 16.05.2022]. Dostupné z: <https://www.tyma.cz/produkty/htd-3m-9/>
- [23] Radartutorial.eu [online]. [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: <https://www.radartutorial.eu/01.basics/rb07.cz.html>
- [24] RM0008 Reference manual: STM32F101xx, STM32F102xx, STM32F103xx, STM32F105xx and STM32F107xx advanced Arm®-based 32-bit MCUs [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: https://www.st.com/resource/en/reference_manual/cd00171190-stm32f101xx-stm32f102xx-stm32f103xx-stm32f105xx-and-stm32f107xx-advanced-arm-based-32-bit-mcus-stmicroelectronics.pdf
- [25] Robotika.cz: Krokové motory [online]. [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: <https://robotika.cz/articles/steppers/cs>
- [26] SEDLÁŘ, Martin, Vojtěch a Erik STAFFA. Zobrazovací metody využívající neionizující záření [online]. 2014, 211 s. [cit. 2021-6-18]. ISBN 978-80-210-7156-8
- [27] SKŘIVÁNEK, Vojtěch. Programujeme STM32: zdolejte jednočipy profesionálů. 2021. ISBN 978-80-7539-117-9.
- [28] TEM Electronics: KROKOVÝ MOTOR – DRUHY A PŘÍKLADY APLIKACÍ KROKOVÝCH MOTORŮ [online]. [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: https://www.tme.eu/cz/news/library-articles/page/41861/krokovy-motor-druhy-a-priklady-aplikaci-krokovych-motoru/?gclid=CjwKCAjwndCKBhAkEiwAgSDKQZvmBqnq--YIQYBoVM7QX6x1LWq85N6b0x_TQVADS71vxmeNZUKLtRoChZMQAvD_BwE
- [29] The working principle, applications and limitations of ultrasonic sensors. Tips on coding, designing, and embedding with microcontrollers [online]. Dostupné z: <https://www.microcontrollertips.com/principle-applications-limitations-ultrasonic-sensors-faq/>
- [30] TOKAR, Daniel. Ultrazvuk: Fyzikální principy, využití v medicíně a terapii [online]. In: . [cit. 2021-6-18]. Dostupné z: http://aldebaran.feld.cvut.cz/vyuka/fpt/prednasky/05_FPT_Ultrazvuk.pdf

- [31] Ultrasonic Sensors: Advantages and Limitations [online]. [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: <https://www.maxbotix.com/articles/advantages-limitations-ultrasonic-sensors.htm/>
- [32] Ultrasonic Sensors: How They Work (and How to Use Them with Arduino) [online]. [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: <https://www.arrow.com/en/research-and-events/articles/ultrasonic-sensors-how-they-work-and-how-to-use-them-with-arduino>
- [33] Ultrazvukové senzory - Senzory pro průmysl. Senzory obecně - Senzory pro průmysl [online]. Copyright © 2012 Všechna práva vyhrazena [cit. 20.06.2021]. Dostupné z: <http://www.senzory-pro-prumysl.cz/index.php/ultrazvukove-senzory>
- [34] Zaber Technologies [online]. Copyright © [cit. 03.09.2021]. Dostupné z: https://www.zaber.com/articles/direct_drive_linear-motors.pdf

Přílohy

Součástí elektronické verze práce jsou následující přílohy:

- Zdrojový kód sestaveného softwaru
- Ukázkové video průběhu monitorování
- Ukázkové video ukončení programu