

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



# 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

## DETEKCE POLOHY OBJEKTU ULTRAZVUKEM PRO ŘÍZENÍ LINEÁRNÍHO MOTORU

CONTROL OF LINEAR MOTOR BASED ON ULTRASONIC DETECTION

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Klára Veselá

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Sekora

BRNO 2021

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Biomedicínská technika a bioinformatika**

Ústav biomedicínského inženýrství

**Studentka:** Klára Veselá

**ID:** 209270

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2020/21

**NÁZEV TÉMATU:**

## **Detekce polohy objektu ultrazvukem pro řízení lineárního motoru**

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1) Prostudujte konstrukce lineárních motorů a možnosti bezkontaktního měření vzdálenosti. 2) Vyberte optimální metodu detekce s ohledem na aplikaci - sledování polohy objektu. 3) Proveďte systémový návrh zařízení, které bude sledovat objekt a udržovat konstantní vzdálenost mezi objektem a polohou lineárního motoru. Pohyb sledovaného objektu předpokládejte pouze v jedné ose, rovnoběžné s trajektorií motoru. Rychlost pohybu objektu bude do 1,5 m/s. 4) Realizujte navržené zařízení a otestujte v laboratoři pohybové analýzy. 5) 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](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:** 8.2.2021

**Termín odevzdání:** 28.5.2021

**Vedoucí práce:** Ing. Jiří Sekora

**doc. Ing. Jana Kolářová, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

**UPOZORNĚNÍ:**

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

## **ABSTRAKT**

Cílem této bakalářské práce je provedení rešerše o možnostech bezkontaktního měření vzdálenosti a konstrukci lineárních motorů. V první části jsou popsány čtyři typy motorů možných k použití v lineárních posuvech, jejich principy, výhody a nevýhody. Dále jsou přiblíženy možnosti bezkontaktního měření vzdálenosti. Na základě popisů jsou pak vybrány nejvhodnější moduly pro návrh systému, který za použití bezkontaktního měření vzdálenosti bude pomocí lineárního posuvu udržovat konstantní vzdálenost od objektu.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Bezkontaktní měření vzdálenosti, lineární motor, HC-SR04, krokový motor, Arduino Uno

## **ABSTRACT**

The focus of this bachelor thesis is to do research on possibilities of contactless distance measurement and linear stage construction. The first part describes four types of engines possible to use in linear stages, their principles, advantages and disadvantages. Next part is focused on possibilities of contactless distance measurement. Based on the descriptions, the most suitable modules are selected for the design of the system. This system will maintain a constant distance from the object by using contactless distance sensor and linear motors.

## **KEYWORDS**

Contactless distance measure, linear stage, HC-SR04, stepper motor, Arduino Uno

VESELÁ, Klára. *Detekce polohy objektu ultrazvukem pro řízení lineárního motoru*. Brno, 2020, 48 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav biomedicínského inženýrství. Vedoucí práce: Ing. Jiří Sekora

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Detekce polohy objektu ultrazvukem pro řízení lineárního motoru“ jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autorka uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské 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

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. XXX YYY, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

# Obsah

|   |           |
|---|-----------|
| Úvod  | 9         |
| <b>1 Konstrukce lineárních motorů</b>                     | <b>10</b> |
| 1.1 Pohon lineárních motorů                               | 10        |
| 1.2 Typy motorů používaných v lineárních posuvech         | 11        |
| 1.2.1 Lineární motor                                      | 11        |
| 1.2.2 Piezoelektrický motor                               | 13        |
| 1.2.3 Krokový motor                                       | 14        |
| 1.2.4 Bezkartáčový stejnosměrný motor                     | 16        |
| 1.2.5 Stejnosměrný motor s komutátorem                    | 18        |
| <b>2 Bezkontaktní měření vzdálenosti</b>                  | <b>20</b> |
| 2.1 Měření vzdálenosti pomocí ultrazvuku                  | 20        |
| 2.1.1 Zdroj ultrazvuku                                    | 21        |
| 2.1.2 Princip ultrazvukového měření vzdálenosti           | 21        |
| 2.1.3 Výhody a nevýhody ultrazvukového měření vzdálenosti | 22        |
| 2.2 Optické měření vzdálenosti                            | 22        |
| 2.2.1 Princip laserového měření vzdálenosti               | 23        |
| 2.2.2 Optické senzory                                     | 23        |
| 2.3 Určení vzdálenosti pomocí radaru                      | 24        |
| 2.4 Indukční senzory a kapacitní senzory                  | 26        |
| <b>3 Systémový návrh</b>                                  | <b>28</b> |
| 3.1 Definice požadavků systému                            | 28        |
| 3.2 Blokové schéma  | 28        |
| 3.3 Výběr komponentů                                      | 29        |
| 3.3.1 Výběr senzoru vzdálenosti                           | 29        |
| 3.3.2 Výběr motorů  | 30        |
| 3.3.3 Výběr řídicí jednotky                               | 31        |
| 3.4 Software  | 31        |
| 3.4.1 Způsob řízení                                       | 31        |
| 3.4.2 Programová implementace                             | 32        |
| <b>4 Výsledky</b>   | <b>34</b> |
| 4.1 Zpracování naměřených hodnot vzdáleností              | 34        |
| 4.2 Popis konstrukce zařízení                             | 35        |
| 4.3 Testování funkčnosti modelu zařízení                  | 35        |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Závěr</b>                                      | <b>37</b> |
| <b>Literatura</b>                                 | <b>38</b> |
| <b>Seznam příloh</b>                              | <b>42</b> |
| <b>A Vývojové diagramy softwaru</b>               | <b>43</b> |
| A.1 Vývojový diagram měření vzdálenosti . . . . . | 43        |
| A.2 Vývojový diagram kalibrace motoru . . . . .   | 44        |
| A.3 Vývojový diagram řízení motoru . . . . .      | 45        |
| <b>B Tabulka hodnot vzdáleností UZ</b>            | <b>46</b> |
| <b>C Konstrukce navrženého zařízení</b>           | <b>48</b> |



# Seznam obrázků

|      |  |    |
|------|--|----|
| 1.1  | Lineární motor s přímým pohonem . . . . .                                  | 10 |
| 1.2  | Typy lineárních motorů . . . . .   | 12 |
| 1.3  | Krokový piezo motor . . . . .  | 13 |
| 1.4  | Setrvačný piezo motor . . . . .  | 14 |
| 1.5  | Ultrazvukový piezo motor . . . . .   | 14 |
| 1.6  | Struktura krokového motoru . . . . .                                       | 15 |
| 1.7  | Principiální schéma unipolárního zapojení . . . . .                        | 16 |
| 1.8  | Principiální schéma bipolárního zapojení . . . . .                         | 16 |
| 1.9  | Schéma stejnosměrného bezkartáčového motoru . . . . .                      | 17 |
| 1.10 | Model stejnosměrného motoru s komutátorem . . . . .                        | 18 |
| 2.1  | Přehled spektra mechanického a elektromagnetického vlnění . . . . .        | 20 |
| 2.2  | Piezoelektrický jev . . . . .  | 21 |
| 2.3  | Princip UZ měření vzdálenosti . . . . .                                    | 22 |
| 2.4  | Princip laserového měření vzdálenosti . . . . .                            | 23 |
| 2.5  | Princip pulsního režimu radaru . . . . .                                   | 24 |
| 2.6  | Princip kontinuálního režimu radaru . . . . .                              | 25 |
| 2.7  | Princip vířivých proudů . . . . .  | 26 |
| 2.8  | Schéma kapacitního senzoru . . . . .                                       | 27 |
| 3.1  | Navržený systém . . . . .  | 28 |
| 3.2  | Blokové schéma navrženého systému . . . . .                                | 29 |
| 3.3  | Ultrazvukový senzor HC-SR04 . . . . .                                      | 29 |
| 3.4  | Schéma zapojení cívek krokového motoru . . . . .                           | 30 |
| 3.5  | Vývojový diagram programu . . . . .  | 33 |
| 4.1  | Znázornění velikosti detekční plochy senzoru . . . . .                     | 34 |
| 4.2  | Experimentální ověření návrhu na konstrukce ze stavebnice Merkur . . . . . | 35 |
| A.1  | Vývojový diagram měření vzdálenosti . . . . .                              | 43 |
| A.2  | Diagram kalibrace pozice motoru . . . . .                                  | 44 |
| A.3  | Vývojový diagram řízení motoru . . . . .                                   | 45 |
| C.1  | Sestrojené zařízení, jiný pohled . . . . .                                 | 48 |

# Úvod

Cílem této bakalářské práce je návrh a konstrukce automatického řízení nosné rampy, které bude využívat bezkontaktního ultrazvukového senzoru k zjištění a udržování konstantní vzdálenosti mezi pojezdem zařízení (vozíkem na rampě) a pozorovaným objektem (schématicky znázorněno na obr. 3.1 na straně 28). Zařízení bude následně využito jako nosič pro další snímací techniku, například klasickou kameru nebo infrakameru, sloužící k monitorování člověka v pohybu. Díky udržování konstantní vzdálenosti bude člověk snímán za stále stejných podmínek (vzdálenost, zorné pole, apod.), což umožní zaznamenání jakýchkoliv změn na stavu sledovaného člověka. Zároveň bude možné nastavovat pozici snímače, aby v závislosti na výšce pozorované osoby byla detekce co nejpřesnější.

# 1 Konstrukce lineárních motorů

Lineární elektromotor je elektrický stroj, který je určený k vytváření posuvného pohybu po přímé nebo zakřivené dráze. U elektrických motorů je pohyb vytvářen tak, že je generováno magnetické pole pomocí cívek. Toto magnetické pole následně reaguje s dalším magnetickým polem vytvářeným permanentními magnety. Samotný pohyb je potom řízen regulací proudu protékajícího cívkami.

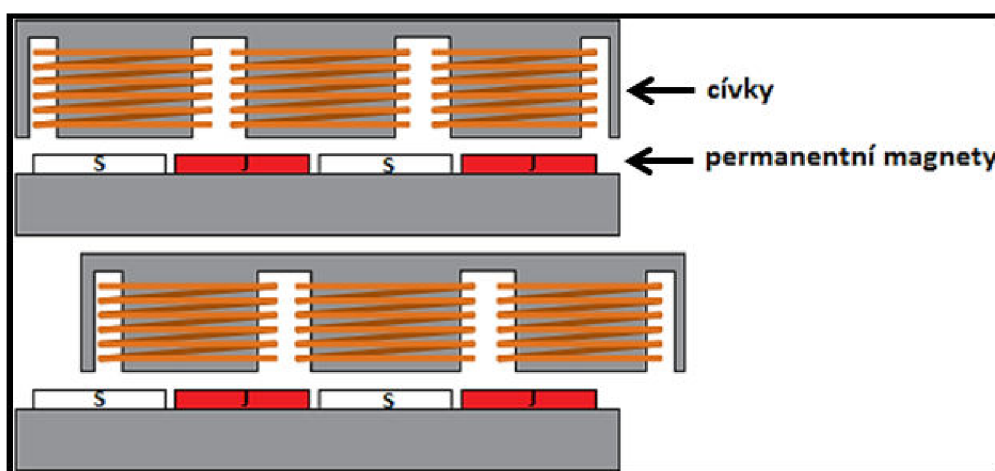
Motory se skládají ze dvou částí - statoru a rotoru. U lineárních motorů je obvykle primární část, stator, složen z plechů z feromagnetických materiálů a trojfázového vinutí. Sekundární část, rotor, je tvořený permanentními magnety. Existují však i jiné typy motorů, které jsou využívány pro lineární posuvy. Jednotlivé typy motorů jsou popsány v kapitole 1.2

## 1.1 Pohon lineárních motorů

U lineární motorů je posuvný pohyb vytvářen dvěma způsoby - přímým a nepřímým.

Lineární motory s **přímým pohonem** nepoužívají převod rotačního pohybu na pohyb posuvný. Magnetická síla mezi státorem a rotorem totiž přímo vykonává posuvný pohyb.

Na obrázku 1.1 je vidět schéma lineárního motoru s přímým pohonem. Po celé délce statoru jsou připevněny magnety se střídavou polaritou. Cívky jsou periodicky buzeny tak, aby se cívka přitahovala s následujícím magnetem ve směru pohybu. Obvykle jsou na rotor umístovány cívky, protože při delších konstrukcích se projeví jejich menší hmotnost oproti magnetům.



Obr. 1.1: Lineární motor s přímým pohonem, převzato z [1]

V porovnání s nepřímým pohybem zde chybí komponenty mechanického převodu rotačního na posuvný pohyb, což nabízí jisté výhody, mezi něž lze zařadit vyšší maximální rychlost díky vyšší účinnosti, nulovou vůli, vyšší přesnost a v neposlední řadě delší životnost díky nulovému tření v mechanismu. Díky těmto vlastnostem je využití přímého pohonu vhodné pro mnoho aplikací při určování polohy a řízení pohybu. [1]

Vyskytují se však i případy, kdy může být volba nepřímého pohonu vhodnější z důvodu negativních vlastností přímého pohonu. Za negativní vlastnost přímého pohonu lineárních motorů je možné považovat například nedostatečnou stabilitu při „vypnutí“, což je nežádoucí především při vertikálním pohybu, kdy zavěšená zátěž vlivem tíhové síly způsobí samovolný pohyb směrem dolů. Dalšími nežádoucími vlastnostmi jsou možnost generování značného tepla při zatížení, což vyžaduje chlazení, vyšší cena mechanismu a velká hmotnost způsobená těžkým materiálem permanentních magnetů při konstrukci delšího posuvného pásu.[1]

Na rozdíl od přímého pohonu spočívá **nepřímý pohon** v převodu rotačního pohybu tvořeného motorem na pohyb posuvný. Tento převod je zajišťován soustavou mechanických částí jako jsou ozubená kola, ozubený pás nebo závitová tyč. Každá z těchto součástí vnáší do systému tření nebo nepřesnost a snižuje tak účinnost motoru.

## 1.2 Typy motorů používaných v lineárních posuvech

V následujících kapitolách jsou stručně popsány principy, výhody a nevýhody motorů, které nacházejí uplatnění při konstrukci lineárních posuvů.

### 1.2.1 Lineární motor

Lineární motor je typ motoru využívající přímý pohon. Skládá se z cívek a permanentních magnetů, které vytvářejí lineární pohyb po přímé nebo zakřivené dráze.

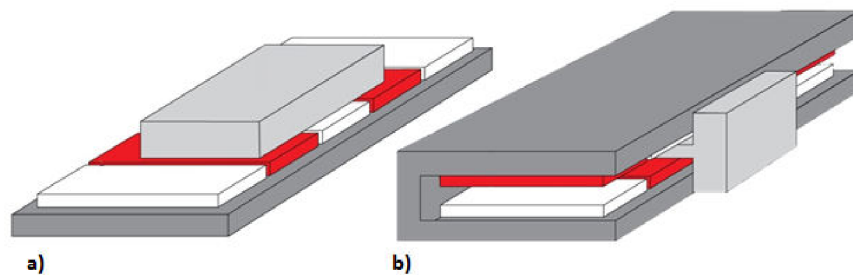
Lineární motory pracují se střídavým napájením. Primární část lineárního motoru tvořená cívkami je připojena k napájecímu zdroji a vytváří magnetické pole. Změnou fáze cívek je dosaženo změny polaritů každé cívky. Vznik pohybu primární části motoru je způsoben magnetickými silami mezi cívkami a permanentními magnety v sekundární části. Rychlost pohybu je řízena rychlostí změny proudu cívkami, generovaná síla je pak určována intenzitou proudu.

Existuje řada různých typů lineárních motorů, které jsou odlišné ve svých vlastnostech, což umožňuje měnit tyto vlastnosti pro konkrétní způsoby využití těchto motorů. Pro porovnání provedení jednotlivých typů lineárního elektrického motoru

jsou používány čtyři hlavní vlastnosti: hustota toku, únik toku, pohyblivá hmotnost a krycí točivý moment.

**Hustota toku** udává velikost magnetického pole, které prochází určitou plochou. Zařízení s vysokou hustotou toku vytvářejí větší sílu. **Únik toku** značí, jak dobře je elektrické pole uzavřeno v motoru. Nízký únik toku znamená menší působení magnetického pole na ostatní části systému. Únik toku také ukazuje na nižší účinnost elektrického motoru. **Pohyblivá hmotnost** označuje hmotnost pohyblivých složek motoru. Vyšší pohyblivá hmotnost znamená nižší zrychlení pro dva motory se stejným výkonem. **Zbytkový moment** je přítomen v každém lineárním motoru, který využívá přitažlivé magnetické síly železa k permanentním magnetům. Když se primární část pohybuje, má „výhodné“ polohy vzhledem k magnetům. Aby motor zůstal v pohybu, když primární část motoru dosáhne těchto poloh, je zapotřebí větší síly. Tato změna síly je známá jako zbytkový moment, který snižuje plynulost pohybu motorů s železným jádrem, ty jsou tudíž méně vhodné pro aplikace, které vyžadují hladkou, konstantní sílu nebo rychlost. [1], [24]

Lineární elektrické motory můžeme podle jejich uspořádání rozdělit do dvou typů: ploché lineární motory a lineární motory ve tvaru písmene U. Tyto typy se od sebe liší výše uvedenými vlastnostmi, svou velikostí a cenou. **Ploché lineární motory**, znázorněné na obrázku 1.2, jsou tvořeny jednou stopou magnetů. Obecně mají nižší profil a nižší náklady, protože na jednu magnetovou stopu není potřeba tolik materiálu jako na lineární motory ve tvaru písmene U. Ploché lineární motory mají obecně vyšší únik toku a nižší poměr síly k hmotnosti.



Obr. 1.2: a) plochý lineární motor, b) lineární motor ve tvaru písmene U, převzato z [1]

**Motory ve tvaru písmene U** znázorněné na obrázku 1.2 mají oproti plochým motorům přidanou další stopu magnetu, umístěnou naproti první stopě magnetu. Mezi oběma kolejemi z magnetů se pohybuje primární část s cívkami. Sestava cívek bez železa má nízkou hmotnost, což umožňuje velmi vysoké zrychlení. Tato

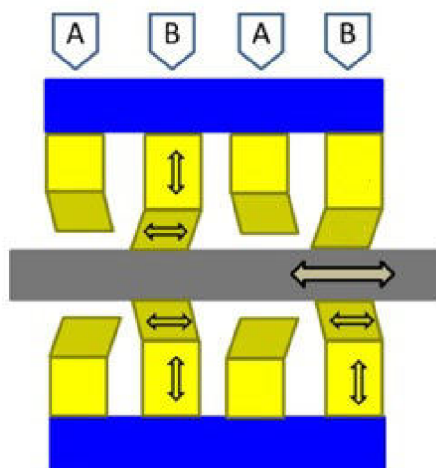
konstrukce je vhodnější pro snížení úniku magnetického toku v důsledku magnetů obrácených k sobě a uložených v kanálu ve tvaru písmene U.[25]

Lineární motory jsou používány v průmyslu k ovládní výkonných automatických zařízení. Absence mechanických převodů jim poskytuje vysokou přesnost, vysokou rychlost, a dlouhodobý provoz. Dále nacházejí využití například v automaticky otevíraných posuvných dveřích, dopravě materiálů pomocí kovového pásu, u obráběcích strojů a v neposlední řadě i k pohonu vysokorychlostních vlaků. [34]

## 1.2.2 Piezoelektrický motor

Piezoelektrický motor je druh elektrického motoru, který je založen na přeměně elektrické energie na mechanickou práci pomocí piezoelektrického jevu. Konkrétně je zde využíván nepřímý piezoelektrický jev, kdy dochází k deformaci materiálu v důsledku přiloženého napětí. Ionty příslušného materiálu jsou v krystalické mřížce uspořádány takovým způsobem, že při přivedení elektrického náboje na povrch materiálu dojde k přesunu iontů tohoto materiálu a tím k jeho deformaci. V zásadě lze piezo motory rozdělit do tří hlavních typů: rezonanční motory (ultrazvukové pohony), setrvačné motory (princip stick-slip) a piezoelektrické pohony.

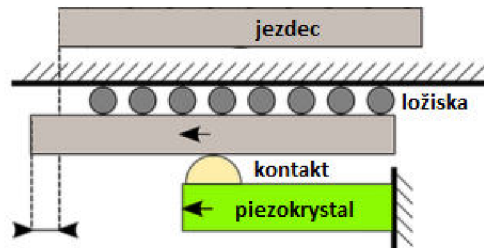
**Krokové piezo motory** pracují koordinovaným pohybem několika piezoelektrických prvků podobajících se "nohám". Tyto nohy provádí synchronní pohyb opakovaním kroků uvolnění-přitažení a přitažení-uvolnění k vytvoření pohybu, jak je vidět na obrázku 1.3.



Obr. 1.3: Krokový piezo motor, převzato z [26]

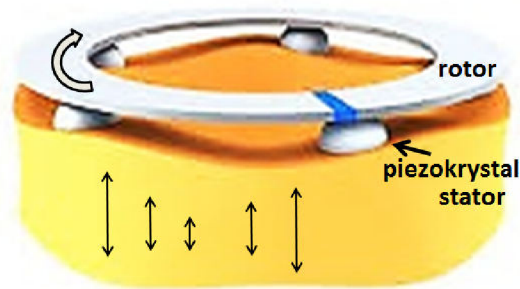
**Setrvačný piezo motor** (Stick-Slip) je složen z piezokrystalu válcového tvaru, posuvníku a ložiska. Tyto motory využívají efekt prokluzu. Nejprve se piezokrystal

pomalu prodlužuje díky pomalému zvyšování napětí. Jezdec se pohybuje společně s pohyblivým kontaktním bodem kvůli třecí síle mezi kontaktním bodem a jezdcem. Potom se piezoelektrický pohon rychle zatáhne aplikací rychle klesajícího napětí. Vlivem setrvačnosti zůstává posuvník nehybný a kontaktní bod sklouzne zpět do své původní polohy. Opakováním těchto dvou kroků je realizován makroskopický pohyb.



Obr. 1.4: Setrvačný piezo motor, převzato z [27]

**Ultrazvukový piezo motor** využívá generování eliptických oscilací kontaktních bodů k vytváření pohybu. Stator je tvořen z elastickým materiálem, který obsahuje piezoelektrické elementy. Ty způsobují vznik povrchové elastické vlny na materiálu statoru. Jednotlivé kontaktní body statoru se pohybují po eliptických dráhách a vytváří tak pohyb.



Obr. 1.5: Ultrazvukový piezo motor, převzato z [26]

### 1.2.3 Krokový motor

Krokový motor je typ elektrického motoru, který se pohybuje po přesně daných krocích. To je umožněno díky využití množství magnetů a cívek.

Stator motoru je tvořen několika cívkami (obr. 1.6 vlevo). Rotor je tvořen hřídelí usazenou na kuličkových ložiskách a prstencem permanentních magnetů.[2]



Obr. 1.6: Struktura krokového motoru [2]

Obecný princip krokového motoru je takový, že cívkou ve statoru prochází proud, čímž je vytvářeno magnetické pole. Toto magnetické pole následně přitáhne opačný pól magnetu rotoru. Vhodným zapojováním cívek je možné dosáhnout vytvoření rotujícího magnetického pole. Vytvořené magnetické pole pak otáčí rotorem. Rotor i hřídel se pak otočí o úhel, při kterém poloha rotoru klade nejmenší odpor magnetickému toku.

Krok vzniká jako odpověď rotoru krokového motoru na řídicí impuls. Rotor (obr. 1.6 vpravo) se při jednom kroku otočí z původní polohy do nejbližší magnetické klidové polohy. Krok je pak definován jako úhel, který odpovídá změně polohy rotoru po dodání jednoho impulsu. Velikost kroku je možné určit ze vztahu:

$$\Phi = \frac{360^\circ \cdot N}{m} \quad (1.1)$$

kde  $m$  je počet fází statoru a  $N$  je počet zubů rotoru.

Rychlost otáčení krokového motoru však není neomezená. Při překročení maximální rychlosti konkrétního daného motoru dochází k tomu, že motory začínají ztrácet kroky případně se zaseknou. Krokové motory také potřebují plynulý rozběh i zastavení, protože kvůli setrvačnosti by rotor nestíhal změnu magnetického točivého pole statoru sledovat.

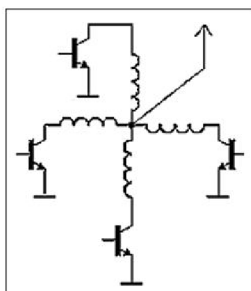
Počet kroků krokového motoru se odvíjí od počtu magnetů, ale může záležet i na způsobu řízení krokového motoru. K řízení krokového motoru je potřeba elektronický obvod generující impulsy v určitém sledu a o určité délce. Impulsy slouží k buzení jednotlivých vinutí rotoru v určitém pořadí. Frekvence, pořadí a délka impulsů z řídicího obvodu udává počet a směr otáček rotoru, dále také jeho točivý moment.

Pro řízení krokového motoru je možné zvolit buď unipolární řízení, nebo bipolární řízení.[3]

Při unipolárním řízení prochází proud v určitém okamžiku právě jednou cívkou. Takto řízený krokový motor má menší proudový odběr a zároveň menší krouticí

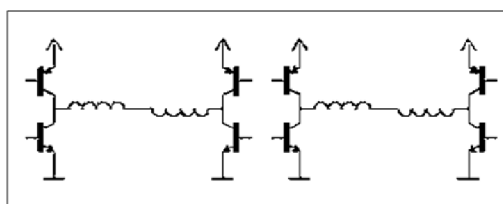


moment. Unipolární řízení je výhodné z hlediska jednoduchého zapojení řídicí elektroniky. Ke každé cívce je potřeba připojit pouze jeden tranzistor. Celkem je tedy potřeba dvakrát méně tranzistorů než u bipolárního zapojení.



Obr. 1.7: Principiální schéma unipolárního zapojení, převzato z [2]

Při bipolárním řízení prochází proud dvěma cívkami uloženými na protějších stranách rotoru. Cívky jsou zapojeny se vzájemně opačně orientovaným magnetickým polem. Toto zapojení poskytuje větší kroutící moment, ale i vyšší odběr proudu. Pro toto zapojení jsou potřeba 2 H-můstky. U bipolárního zapojení je tedy potřeba větší počet tranzistorů. Jedná se tak i o složitější zapojení.



Obr. 1.8: Principiální schéma bipolárního zapojení, převzato z [2]

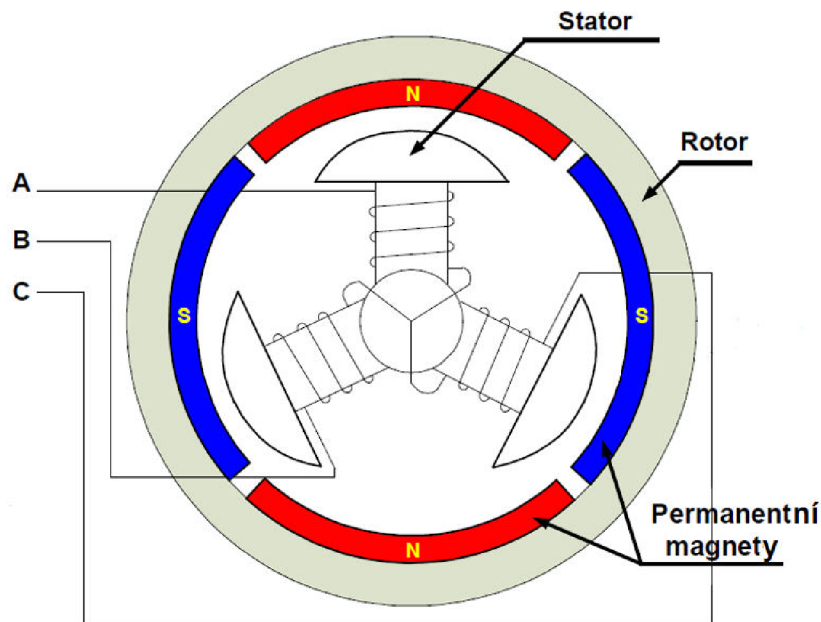
Mezi hlavní pozitiva krokových motorů je možné zařadit přesnost kroku, o který se rotor otočí, dále snadné řízení jak polohy rotoru, tak rychlosti jeho otáčení. Krokové motory se vyznačují mechanickou odolností, protože nemají mechanický komutátor. Nevýhodou krokových motorů je již zmíněná ztráta kroku, která nastává při překročení mezního zatížení motoru.

#### 1.2.4 Bezkartáčový stejnosměrný motor

Bezkartáčové stejnosměrné motory (BLDC<sup>1</sup>) se řadí do skupiny synchronních elektromotorů. Jsou tedy charakteristické tím, že jejich rotor se otáčí synchronně s

<sup>1</sup>Brushless DC motor

magnetickým polem statoru. Samotný motor je tvořen rotorem s permanentními magnety, stator je tvořen cívkami. Podle typu rotoru je možné bezkartáčové motory rozlišit na motor s vnitřním rotorem, tedy rotor se nachází uvnitř statoru, a s vnějším rotorem, kdy je naopak stator obklopen rotorem. Druhý způsob je vidět na obrázku 1.9.



Obr. 1.9: Schéma stejnosměrného bezkartáčového motoru [5]

Princip fungování je obdobný jako u krokového motoru. Cívkami statoru prochází stejnosměrný proud, který způsobí, že cívky začnou vytvářet elektromagnetické pole. Na toto pole pak reaguje magnetické pole permanentních magnetů rotoru. Opačné póly statoru a rotoru jsou pak magnetickými silami přitahovány k sobě, což zapříčiní vznik otáčivého pohybu rotoru. Cívky jsou spínány tak, aby bylo zaručeno plynulé otáčení rotoru.

U bezkartáčových stejnosměrných motorů je mechanický komutátor nahrazen elektronickým systémem. Elektronický snímač detekuje úhel rotoru a řídí spínače, například tranzistory, které přepínají proud cívkami. Elektromagnety tak vytvářejí točivý moment v jednom směru. Odstranění fyzického kontaktu kartáčů s cívkami umožňuje menší tření, což zvyšuje odolnost a životnost motoru. Životnost motoru je tedy dále ovlivňována životností ložisek .

Pro řízení bezkartáčového motoru je vhodné znát v daný okamžik polohu rotoru. Nejčastěji jsou k zjištění polohy rotoru využívány Hallovy sondy, které generují kladné nebo záporné napětí v závislosti na jejich vzájemné poloze vůči permanent-

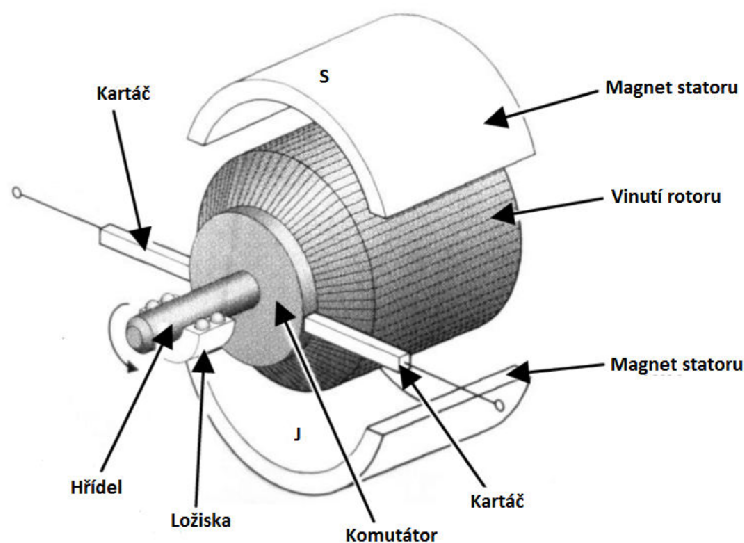
ním magnetům rotoru. Jestli je generováno kladné nebo záporné napětí závisí na polaritě magnetu.

Bezkartáčové motory jsou vhodné pro trvalý provoz, vyznačují se vysokou účinností, dlouhou životností a vysokým točivým momentem. Tyto motory mají zapouzdřenou konstrukci, není tedy nutná jejich údržba.[4] Na rozdíl od krokových motorů mají tyto motory méně magnetů a z toho důvodu jsou bez převodů nevhodné pro regulace polohy, protože mají velký úhel otočení při jednom kroku.

### 1.2.5 Stejnosměrný motor s komutátorem

Stejnosměrný motor s komutátorem je druh elektrického motoru, který k napájení rotoru využívá komutátor.

Komutátor je zařízení, které umožňuje přepínání proudu vedeného na cívky rotoru, aby se vytvořil konstantní točivý moment v jednom směru. Komutátor je rozdělen na části pomocí izolujícího materiálu tak, aby při otáčení komutátoru docházelo k přepólování jednotlivých cívek. Elektrické kontakty tzv. kartáče jsou vyrobeny z vodivého materiálu, jako je uhlík nebo měď, a tlačí proti komutátoru. Tím je vytvářen kontakt s následnými segmenty komutátoru při jeho otáčení.



Obr. 1.10: Model stejnosměrného motoru s komutátorem [7]

Každý segment komutátoru je připevněn ke každému konci cívky rotoru. Pokud má rotor více cívek, komutátor bude rozčleněn na stejné množství segmentů a každá cívka bude připojena na dva protější segmenty. Pružinové kartáče jsou umístěny po stranách komutátoru a při otáčení se ho dotýkají, přičemž napájejí segmenty komutátoru a odpovídající cívky.[8]

Princip tohoto motoru je takový, že když je napájena cívka, dochází ke vzniku magnetického pole. Pokud vezmeme v úvahu motor se dvěma magnety, jedna strana rotoru bude odtlačena od prvního magnetu a přitahována směrem k druhému, což způsobí vznik rotačního pohybu. Aby se motor otáčel v jednom směru, komutátory ve dvoupólovém motoru po každé polovině cyklu změni směr proudu cívkami na opačný, což způsobí, že se motor otáčí stále stejným směrem.

Mezi výhody tohoto typu motoru patří nízká cena a snadné řízení. Nevýhodou je, že není známa poloha hřídele. Tento nedostatek je možné napravit vnějším snímačem, například optickým enkodérem. Mezi další nevýhody se řadí nutnost údržby kartáčů, mechanické omezení rychlosti kartáči a kratší životnost ve srovnání s bezkartáčovými motory.

## 2 Bezkontaktní měření vzdálenosti

Bezkontaktní měření vzdálenosti je v dnešní době velmi rozšířené. Nachází využití ve stavebnictví, navigaci, v průmyslové výrobě i v medicíně (neinvazivní diagnostické metody). Bezkontaktní měření vzdálenosti je také užitečné při měření vzdálenosti ve špatně přístupném terénu nebo u objektů, kterých se z nějakého důvodu nelze dotknout. Obecně je možné bezkontaktně měřit vzdálenost detekcí odrazu různých druhů vlnění, konkrétně se jedná o elektromagnetické vlnění a vlnění prostředí. Měřenou veličinou je pak čas, za který se vlna odrazí a vrátí k vysílači. Volba použitého vlnění závisí na aplikaci. V případě menších objektů je vhodné využít kratší vlnové délky a naopak. Detekovaný objekt musí být vždy větší než vlnová délka použitého vlnění. Při měření vzdálenosti se v současnosti používá vlnění v oblasti viditelného světla (laser), mikrovln (radar) a ultrazvukové vlnění. Přehled vlnění je znázorněn na obrázku 2.1.



Obr. 2.1: Přehled spektra mechanického a elektromagnetického vlnění

Kromě využití těchto typů vlnění se dále využívá změny parametrů okolí senzoru při přiblížení detekovaného objektu. Mezi tyto parametry patří zejména magnetické a elektrické vlastnosti prostředí. Konkrétně se využívají indukční a kapacitní senzory. Ty však nacházejí uplatnění spíše při detekci přítomnosti objektů než při měření jejich vzdálenosti.

### 2.1 Měření vzdálenosti pomocí ultrazvuku

Ultrazvuk je mechanické vlnění s frekvencí vyšší než 20 kHz. Jeho schopnost se výrazně odrážet od překážek umožňuje jeho využití při měření vzdálenosti objektu.

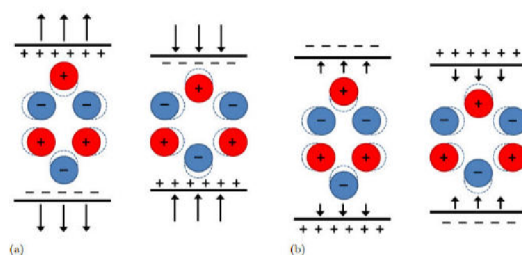
Ultrazvukové měření vzdálenosti vychází z měření doby, za kterou se ultrazvuková vlna vyslaná vysílačem odrazí od detekovaného objektu vrátí k snímači. Tento způsob měření vzdálenosti zajišťuje spolehlivou detekci objektu. Ultrazvukové senzory jsou schopné měřit vzdálenost nezávisle na barvě nebo úpravě povrchu materiálu objektu. Ultrazvukové senzory jsou vyráběny v různých provedeních. Jedním možným provedením je umístění vysílače i přijímače do jednoho krytu, druhou variantou je umístit vysílač i přijímač do samostatných krytů.[13]

### 2.1.1 Zdroj ultrazvuku

K vytváření ultrazvukových vln lze využít dvou typů elektroakustických měničů, které převádějí elektrickou energii na mechanickou a naopak.

Magnetostrikční měniče jsou založeny na principu magnetostrikce, kdy po vložení magnetického materiálu do magnetického pole dojde k deformaci tohoto materiálu. Tento proces funguje i opačným směrem, tedy po aplikaci mechanické síly na použitý materiál dojde ke změně magnetizace. Tyto měniče pracují na nižších frekvencích přibližně do 150 kHz a k jejich konstrukci se používají především feromagnetické materiály.

Piezoelektrické měniče jsou založeny na piezoelektrickém jevu. Některé materiály mají ionty v krystalické mřížce uspořádány takovým způsobem, že při deformaci krystalu vznikne na jeho povrchu elektrický náboj. Tato přeměna mechanické energie na elektrickou je nazývána přímý piezoelektrický jev. Při opačném procesu přivedení elektrického náboje na povrch krystalu dojde k deformaci krystalu, což je nazýváno nepřímým piezoelektrickým jevem. Ve vysílači je tedy využíván nepřímý piezoelektrický jev zatímco v přijímači přímý piezoelektrický jev.

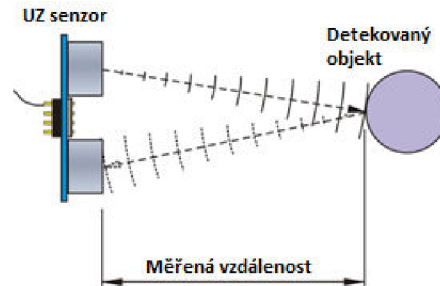


Obr. 2.2: a) přímý piezoelektrický jev, b) nepřímý piezoelektrický jev

### 2.1.2 Princip ultrazvukového měření vzdálenosti

Základní princip měření ultrazvukové vzdálenosti je založen na odrazu ultrazvukové vlny od detekovaného objektu. Ultrazvukové vlny, které vznikají v měniči (např.

nepřímým piezoelektrickým jevem) se šíří prostředím a po odrazu od překážky vrací zpět k měniči. Vlivem mechanické síly vlnění dojde k deformaci materiálu a vzniku elektrického pulsu. K určení vzdálenosti je pak potřeba pouze doba od vyslání vlnění po přijetí odraženého vlnění. [14]



Obr. 2.3: Princip UZ měření vzdálenosti, převzato z: [28]

### 2.1.3 Výhody a nevýhody ultrazvukového měření vzdálenosti

Pomocí ultrazvukových senzorů je možné detekovat všechny materiály, které odrážejí zvuk, bez ohledu na jejich barvu. Na rozdíl od senzorů, které využívají světlo nebo kamery, tmavé prostředí nijak neovlivňuje funkčnost ultrazvukového senzoru. Ultrazvukové senzory také nejsou tolik ovlivňovány prachem nebo vysokou vlhkostí (mlha), které znesnadňují správné fungování optických senzorů. Senzory detekují objekty nacházející se ve vzdálenosti řádově centimetrů až několika metrů.[15]

Vzhledem k tomu, že mechanické vlnění je schopno šíření pouze v látkovém prostředí, nelze ultrazvuk využít při měření vzdálenosti ve vakuu. Přesnost snímání vlnění odraženého od objektu tvořeného měkkými materiály je menší, protože objekty pokryté např. velmi měkkou látkou pohlcují více zvukových vln, tudíž zpětně odražený signál je slabší a tedy hůře detekovatelný. Dalo by se také říct, že ultrazvukové senzory mají omezený rozsah detekce, což je ale pro některé aplikace naprosto dostačující.

## 2.2 Optické měření vzdálenosti

Metody bezkontaktního měření založené na optických jevech využívají vlastností laserových paprsků. Lasery generují monochromatické, soustředěné, intenzivní paprsky světla. Ty se pohybují poměrně konstantní rychlostí a nedochází u nich tolik k oslabení paprsku z důvodu rozptylu světla, což znamená, že laserový paprsek je

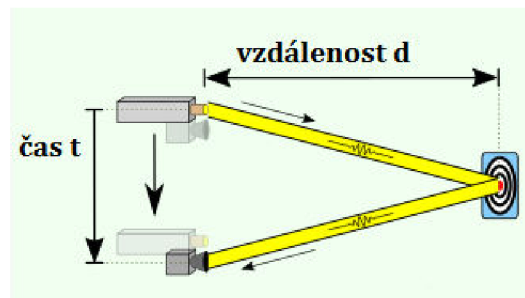
chopen urazit větší vzdálenost aniž by nějak výrazně ztrácel na intenzitě. Ve srovnání s běžným bílým světlem si laserový puls při odrazu zachovává velkou část své původní intenzity, což je velmi důležité při výpočtu vzdálenosti k objektu. Z toho důvodu jsou vhodné pro měření vzdáleností. [9]

### 2.2.1 Princip laserového měření vzdálenosti

Princip měření vzdálenosti pomocí laseru vychází z odrazu světelného paprsku od detekovaného objektu.[10] Zdroj laserového paprsku vysílá krátké impulsy světla směrem k detekovanému objektu. Laserový paprsek se od tohoto objektu odráží a je zachycen senzorem. Vzdálenost objektu lze potom určit ze vztahu:

$$d = \frac{c \cdot t}{2} \quad (2.1)$$

kde  $c$  se rovná rychlosti světla a  $t$  se rovná době, za kterou urazí paprsek dvojnásobek vzdálenosti mezi senzorem a objektem. [9] Princip je znázorněn na obrázku 2.4.



Obr. 2.4: Princip laserového měření vzdálenosti, převzato z: [29]

Protože je rychlost světla konstantní a není příliš závislá na změně okolních podmínek, je určení vzdálenosti pomocí této metody velmi přesné. Vzhledem k velké rychlosti světla je její využití vhodné spíše na větší vzdálenosti, aby bylo možné vypočítat rozdíly časů. Přesnost měření je závislá na viditelnosti měřeného objektu a jeho dostatečné odrazivosti pro senzorem vysílané světlo, aby byl odražený světelný impuls zaznamenán ještě v dostatečné kvalitě.

### 2.2.2 Optické senzory

Zdroj světla vysílá světelný paprsek, který je přijímán optickým senzorem. Dnes se jako vysílače používají LED diody nebo laserové diody. K přijímání světelného signálu jsou používány fototranzistory, nebo fotodiody. Optické senzory mají velmi



mnoho možností využití. Jsou používány v nejen při jednoduchém změření vzdálenosti, ale při automatickém snímání ve výrobních technologiích, k úpravě jasu obrazovky mnoha dalších uplatněních. Jejich velkou výhodou je necitlivost vůči elektromagnetickému rušení. Jsou velmi citlivé, malé a vhodné pro měření o větších vzdálenostech. Tyto senzory se nehodí do prostředí s vysokou prašností, případně dalších prostředí, která by znemožňovala přímé šíření světelného paprsku.

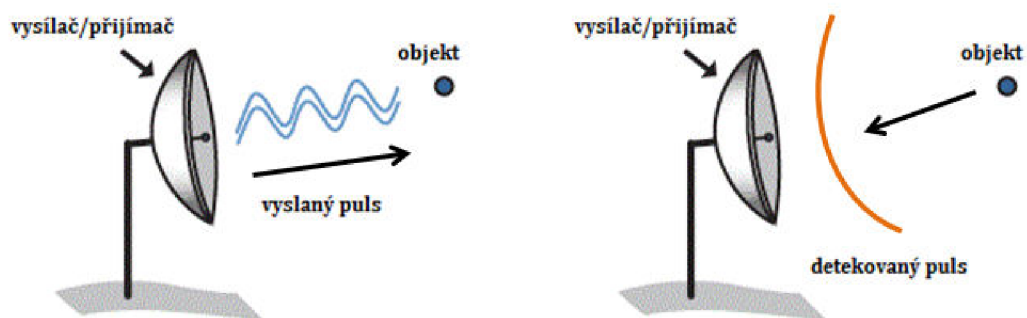
Fotodioda je polovodičová součástka tvořená PN přechodem, která je citlivá na světlo. Při osvětlení PN přechodu fotodiody je elektronům dodána potřebná energie k tomu, aby vznikly volné elektrony a díry. Tento proces se nazývá vnitřní fotoelektrický jev. Uvolněné částice jsou pak nositeli proudu, který je následně změřen.[11]

Fototranzistor je polovodičová součástka tvořená dvojicí PN přechodů. Jedná se tedy o bipolární tranzistor, který je obalen průhledným pouzdem. Fototranzistor funguje stejně jako fotodioda na principu vnitřního fotoelektrického jevu. Při osvětlení PN přechodu jsou generovány volné elektrony a díry, elektrony se v elektrickém poli pohybují do báze. Tranzistor se otevře a prochází jím proud z připojeného zdroje. Velikost tohoto proudu je úměrná intenzitě osvětlení fototranzistoru. Díky zesilovacímu účinku jsou fototranzistory citlivější na osvětlení než fotodiody.[12]

Příkladem optického senzoru pro použití v průmyslu je reflexní optočlen.

## 2.3 Určení vzdálenosti pomocí radaru

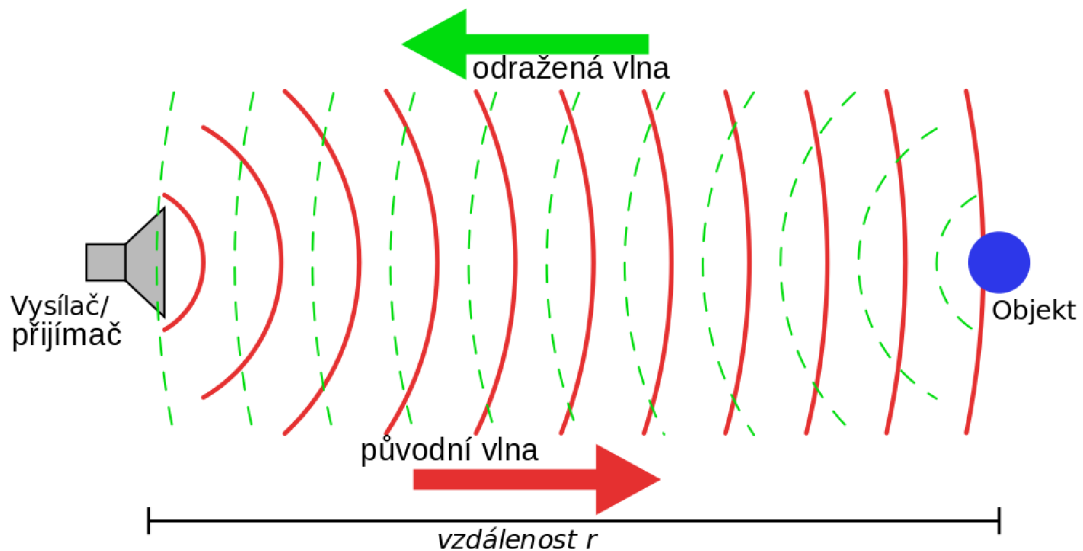
Radar je zařízení, které vysílá elektromagnetické vlny, konkrétně vlny ve frekvenční oblasti mikrovln, a detekuje polohu, rychlost nebo velikost objektu na základě odrazu těchto vln. Pro zjištění vzdálenosti detekovaného objektu je možné využít dva režimy vysílání vln - pulzní a kontinuální.



Obr. 2.5: Princip pulzního režimu radaru, převzato z: [30]

Princip pulzního režimu je takový, že vysílačem je vyslán puls, tento puls se následně s předem stanovenou rychlostí šíří prostředím, odrazí se od objektu a je

detekován přijímačem. Měřenou veličinou je čas potřebný k navrácení odražené vlny k přijímači radaru. Ze známé doby šíření vlnění a rychlosti šíření elektromagnetického vlnění je následně možné dopočítat vzdálenost objektu (viz rovnice na straně 23). U tohoto režimu je důležité dbát na frekvenci vyslaných pulsů. Pokud by byla frekvence vyslaných pulsů příliš vysoká, nebylo by možné rozlišit, o který odražený puls se jedná, tedy nebylo by ani možné určit vzdálenost objektu.



Obr. 2.6: Princip kontinuálního režimu radaru, převzato z: [31]

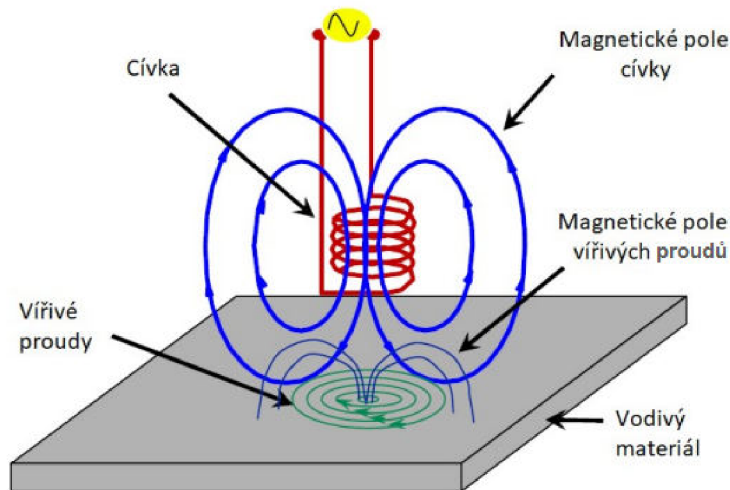
Druhou variantou je využití kontinuálního režimu, kdy vysílač kontinuálně vysílá elektromagnetické vlnění, které se odráží od objektu a následně je detekováno (viz obr. 2.6). U této varianty by však nebylo možné určovat dobu mezi odesláním a přijetím signálu. Z toho důvodu je zaváděna úprava vysílaného signálu pomocí modulace.

Modulaci vysílaného signálu je možné zavést změnou parametrů vlnění, tedy frekvence, amplitudy nebo fáze. V praxi jsou používány frekvenční nebo fázová modulace. Vysílaný frekvenčně modulovaný signál, tedy takový, který se s časem mění, je pak možné porovnávat s přijímaným. Frekvenční posun se s časovým zpožděním zvyšuje. Měnit frekvenci je v však možné pouze v určitém rozsahu, z toho důvodu je signál měněn periodicky.

Výhodou kontinuálního měření je velmi vysoká přesnost měření vzdálenosti, schopnost měřit i malé vzdálenosti. Tento systém je možné využít i při současném měření vzdálenosti a radiální rychlosti.[23]

## 2.4 Indukční senzory a kapacitní senzory

**Indukční senzory** Využití senzorů pracujících na principu měření změny indukčnosti cívky nabízí další možnost, jak změřit vzdálenost objektu. Součástí indukčního senzoru je LC oscilační obvod. Na cívku je přivedené střídavé napětí, což vede ke vzniku magnetického pole kolem této cívky. Při umístění elektricky vodivých předmětů do magnetického pole cívky dochází v těchto vodivých předmětech ke vzniku vířivých proudů. Vznikající vířivé proudy pak vytvářejí elektromagnetické pole, které má opačný směr působení, než magnetické pole vytvořené cívkou. Díky tomu dochází ke zmenšení indukčnosti cívky i změně impedance cívky. Změnu impedance zjistíme z útlumu amplitudy oscilací. Pokles amplitudy pod určitou hodnotu je pak vyhodnocen jako detekce objektu v magnetickém poli cívky.[18]



Obr. 2.7: Princip vířivých proudů [16]

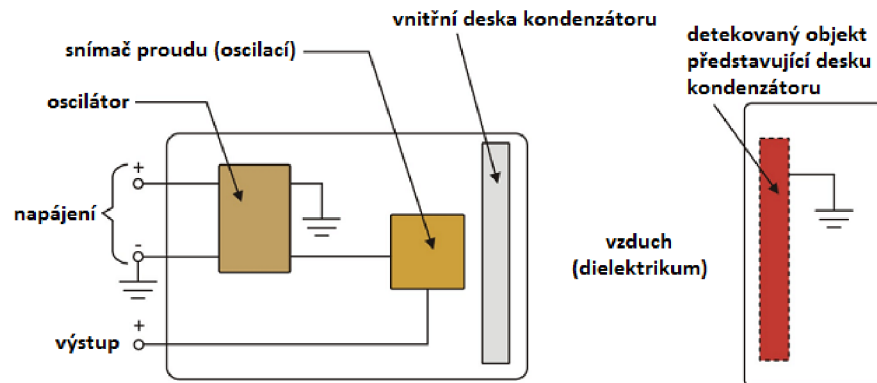
Indukční senzory jsou používány pro detekci objektů ve vzdálenosti řádově milimetrů. Výhodou indukčních senzorů je vysoká přesnost, dlouhá životnost i odolnost vůči nečistotám a zvýšené vlhkosti. Detekce objektu je však omezena pouze na kovové materiály, ve kterých vznikají již zmíněné vířivé proudy. Snímání indukčního senzoru je pak závislý na konkrétním druhu kovu, tvaru a velikosti objektu.[17]

**Kapacitní senzory** Bezkontaktní kapacitní senzory fungují na principu měření změn kapacity materiálů. Kapacita kondenzátoru s paralelními deskami je dána permitivitou desky a společnou plochou elektrod, jak je vidět ze vztahu

$$C = \frac{\epsilon_r \cdot S}{d} \quad (2.2)$$

kde  $S$  je obsah plochy desek,  $d$  je vzdálenost desek a  $\epsilon_r$  je relativní permitivita vakua. Z tohoto vztahu tedy vyplývá, že při změně jakéhokoli parametru z tohoto vztahu vyvoláme požadovanou změnu kapacity.

Kondenzátor se tedy skládá ze dvou desek a dielektrika. V případě kapacitních senzorů je jedna deska součástí senzoru a druhou desku představuje detekovaný objekt. Změnou vzdálenosti je pak docíleno změny samotné kapacity. Pokud je kondenzátor součástí LC oscilátoru, projeví se změna kapacity jako změna frekvence či amplitudy oscilací. [19] [20]



Obr. 2.8: Schéma kapacitního senzoru [21]

Kapacitní senzory se využívají i při detekci hladiny kapaliny, kdy je využívána změna permitivity prostředí mezi deskami, závislá na výšce hladiny kapaliny.

Kapacitní senzory jsou vhodné pro detekci libovolného objektu s permitivitou větší než má vzduch. Umožňují tedy detekci téměř libovolného materiálu, nezávisle na jeho elektrické vodivosti.

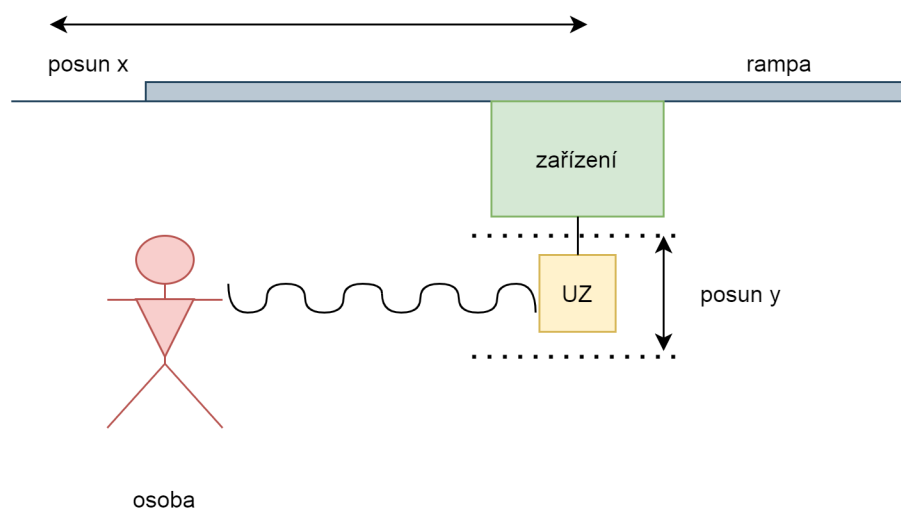
Tyto senzory jsou velmi citlivé, rychle reagují, mají nízkou spotřebu energie a malé rozměry. Nežádoucí je jejich ovlivnitelnost teplotou, vlhkostí i prachovými částicemi. Ve srovnání s indukčními senzory mají také nižší přesnost. [21]

## 3 Systémový návrh

### 3.1 Definice požadavků systému

Navrhované zařízení by mělo udržovat konstantní vzdálenost od objektu, například od člověka. Očekávaná rychlost pohybu objektu je do 1,5 m/s, objekt se bude pohybovat pouze v jedné ose. Nepředpokládají se rychlé změny pohybu objektu.

K zjišťování vzdálenosti objektu bude využíván bezkontaktní měřič vzdálenosti. Tento měřič bude ve velmi krátkých časových intervalech měřit vzdálenost pohybujícího se objektu. Z naměřených hodnot vzdáleností bude vypočítána rychlost objektu, jejíž vyhodnocení umožní plynulejší pohyb sestavovaného zařízení. Navržený systém tak bude reagovat úpravou své rychlosti v závislosti na vzdálenosti detekovaného objektu.



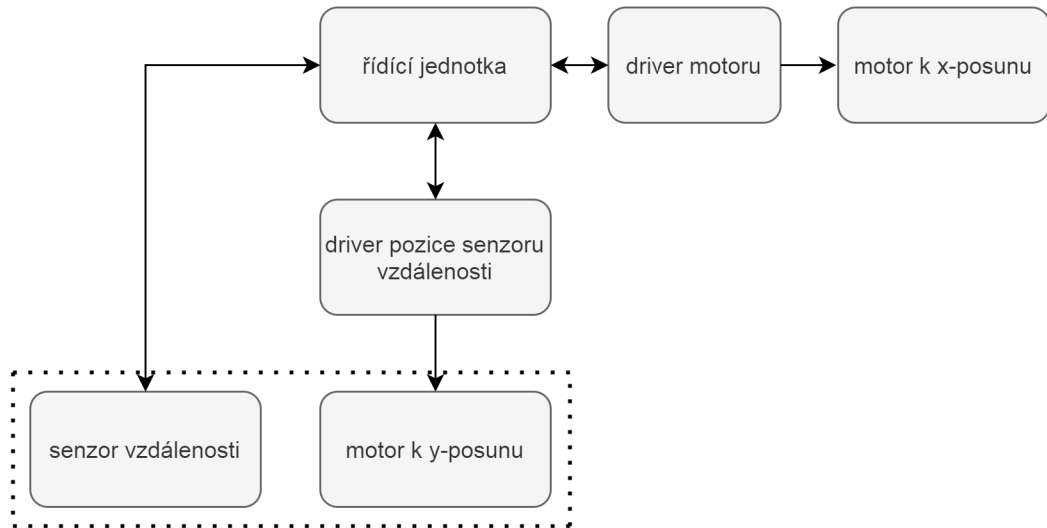
Obr. 3.1: Navržený systém

K sestavení zařízení bude třeba senzor, který zajistí určení vzdálenosti, řídicí obvod k vyhodnocení naměřených hodnot, jeden motor na pohyb celým zařízením a další motor, který by měnil pozici detektoru ve svislém směru. Každý motor bude řízen samostatným driverem.

### 3.2 Blokové schéma

Na obrázku 3.2 je znázorněno blokové schéma sestávající z šesti hlavních částí. První částí je ultrazvukový senzor, který měří vzdálenost objektu. Naměřené údaje budou

posílány do řídicí jednotky, ve které následně budou zpracovávány. Ultrazvukový senzor bude umístěn na lineárním pojezdu, což mu umožní pohybovat se ve vertikálním směru. Tento pohyb bude řízen driverem pro motor použitý v tomto lineárním pojezdu. Driver dává informace o změně polohy řídicí jednotce a ta naopak pomocí driveru řídí pohyb motoru. Stejná řídicí jednotka pak bude komunikovat s driverem motoru, který bude pohybovat celým zařízením.



Obr. 3.2: Blokové schéma navrženého systému

### 3.3 Výběr komponentů

#### 3.3.1 Výběr senzoru vzdálenosti

Pro měření vzdálenosti byl vybrán ultrazvukový senzor HC-SR04.



Obr. 3.3: Ultrazvukový senzor HC-SR04 [32]

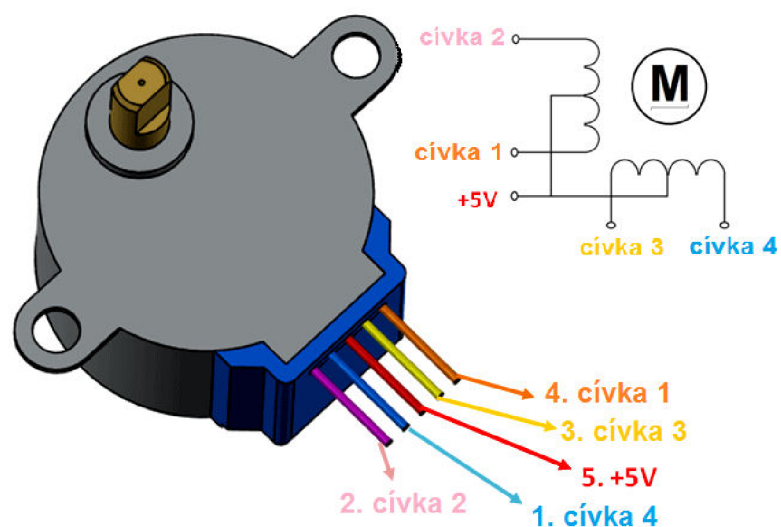
Tento senzor je vhodný pro měření vzdálenosti v rozsahu 2 cm až 4 m, nejpřesnějších hodnot dosahuje do vzdálenosti 2 metrů. Pracovní úhel detekce senzoru je 12 stupňů. Součástí desky je jeden UZ vysílač a jeden UZ přijímač. Senzor je napájen 5 V. Na obrázku senzoru (obr. 3.3) je vidět vstup TRIG a výstup ECHO. Na vstup TRIG je přiveden kladný puls o šířce 10  $\mu$ s. V reakci na tento puls vyše modul osm ultrazvukových pulsů o frekvenci 40 kHz a následně detekuje odražený signál. [33]

### 3.3.2 Výběr motorů

Na základě získaných informací byly vybrány unipolární krokové motory pro pohyb v obou osách, které jsou dostatečně zpřevodované k vytvoření potřebného kroutícího momentu. Krokové motory vynikají dobrou dostupností a snadným řízením díky pevně definovanému kroku. Díky tomu, že má hřídel krokového motoru při klidovém proudu pevnou polohu, není třeba jejího dodatečného snímání. Polohu motoru je na začátku potřeba pouze zkalibrovat pomocí koncového spínače.

Jako konkrétní typ motoru byl vybrán krokový motor značky ROHS model 28BYJ-48. Jmenovité napětí motoru je 5 V. Motor obsahuje čtyři cívky, jejichž přepínáním vzniká pohyb rotoru.

[37] Na obrázku 3.4 je znázorněno zapojení cívek tohoto motoru.



Obr. 3.4: Schéma zapojení cívek krokového motoru [37]

### 3.3.3 Výběr řídicí jednotky

K řízení navrhovaného systému byla vybrána platforma Arduino Uno z důvodu nenáročnosti programu a dobré dostupnosti dokumentace, návodů, atd.

Tato vývojová deska je založena na mikrokontroléru ATmega328P firmy Microchip (Atmel). Deska disponuje USB rozhraním a vstupem vnějšího napájení.

Na desce je vyvedeno 20 vstupně/výstupních pinů, z toho 6 je připojeno na vnitřní A/D převodník (analogové vstupy). Další 6 pinů plní funkci nezávislých PWM výstupů. Mimo to je na desce k dispozici stabilizovaný výstup 5 a 3,3 V. Taktovací kmitočet mikrokontroléru je 16 MHz. Ultrazvukový senzor je k desce připojen dvěma signálovými a dvěma napájecími vývody. Každý krokový motor je řízen čtyřmi signály, navíc je k němu třeba doplnit nejméně jeden koncový spínač. Celkem je tedy zabráno minimálně 12 signálových pinů. [36]

## 3.4 Software

Software je pro dílčí části sestaven v programovacím prostředí Arduino IDE.

### 3.4.1 Způsob řízení

**Řízení ultrazvukového senzoru** je realizováno pomocí Arduino desky, kdy je na vstupní pin TRIG přiveden puls. V důsledku tohoto pulsu vyšle vysílač ultrazvukový puls, který je po odražení od překážky detekován přijímačem, a odeslán na pin ECHO. Z časového intervalu signálů z pinů TRIG a ECHO je dopočítána vzdálenost za využití vypočtené konstanty. Tato konstanta je vypočítána z hodnoty rychlosti šíření zvuku ve vzduchu při teplotě 20 °C (340 m/s), kdy je tato hodnota převedena na cm/ $\mu$ s a následně podělena dvěma. Vypočítaná konstanta získaná z obrácené hodnoty výsledku má hodnotu 58,31. Touto konstantou je následně podělen změřený čas.[33] Dalšímu zpracování naměřených hodnot se věnuje podkapitola programová implementace (3.4.2).

**Řízení krokového motoru** je opět realizováno pomocí Arduino desky. Ta je s driverem motoru spojena šesti vodiči, z nichž čtyři vedou k budičům cívek a dvě k napájení.

V motoru jsou tedy čtyři cívky, jeden konec každé cívky je připojen k napájecímu napětí 5 V (červený) a druhý konec každé cívky (oranžový, růžový, žlutý a modrý) je vyveden jako vodič. Krokovým motorem lze otáčet, pouze pokud jsou cívky napájeny (uzemněny) v určitém sledu. Tuto posloupnost řídí Arduino deska. Jednotlivé cívky jsou algoritmem spínány dle následující tabulky. Spínány jsou vždy dvě cívky kvůli dosažení větší síly.



Tab. 3.1: Způsob spínání cívek

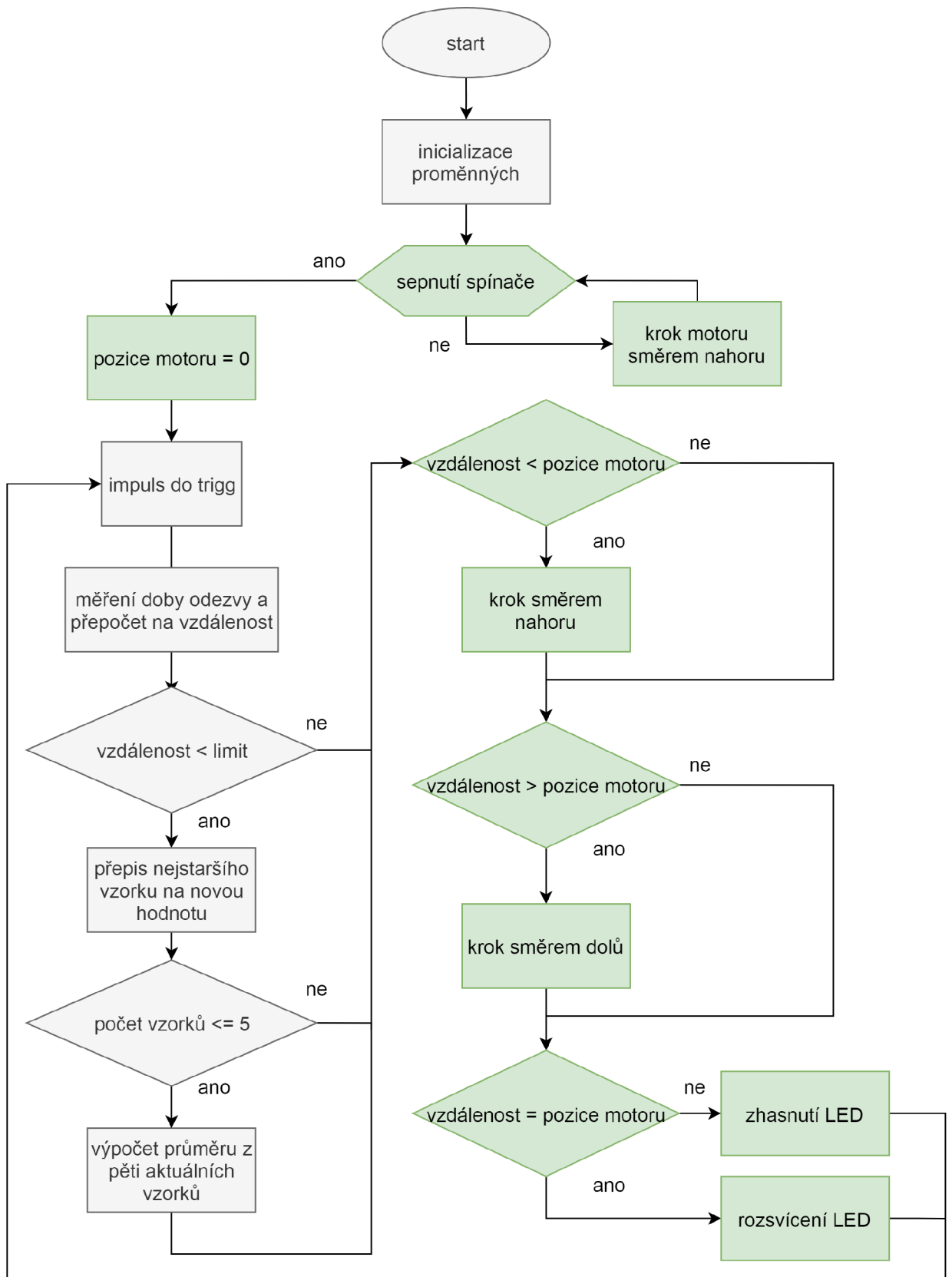
| krok | A | B | C | D |
|------|---|---|---|---|
| 1    | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 2    | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 3    | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 4    | 0 | 0 | 1 | 1 |

### 3.4.2 Programová implementace

První část programu se týká měření a zpracování hodnot získaných UZ senzorem. Na obrázku 3.5 je vidět vývojový diagram programu, přičemž šedá část se zabývá měřením vzdálenosti a zpracováním naměřených dat. Na začátku běhu programu je provedena inicializace proměnných. Poté je senzorem vyslán impuls a měří se doba odezvy. U změřené doby odezvy se provádí přepoččet na vzdálenost v cm. Nakonec jsou vybírány chybně naměřené hodnoty přesahující garantovaný dosah senzoru (do 400 cm), tyto hodnoty jsou nahrazeny nulovou hodnotou. Výsledná hodnota vzdálenosti je počítána průměrem pěti nejnovějších naměřených hodnot. Tato hodnota pak řídí chod krokového motoru.

Druhá část programu se věnuje řízení pohybu krokového motoru. Algoritmus využívá Arduino knihovnu `Stepper.h`. Nejprve je nastavena nulová pozice motoru. To je realizováno pomocí koncového spínače, který je manuálně spouštěn.

Třetí část programu obsluhuje samotný pohyb motorem. Algoritmus porovnává pozici motoru se vzdáleností naměřenou senzorem. Pokud je vzdálenost menší než pozice motoru, závaží na lanku je navíjeno směrem vzhůru. Jestliže je vzdálenost větší než pozice motoru, závaží na lanku je odvíjeno směrem dolů. V případě, že jsou si vzdálenost a pozice motoru rovny, žádný pohyb se nekoná. Zda se pohyb koná či nekoná také signalizuje svícení LED diody. V momentě, kdy motor dosáhne vzdálenosti objektu, se LED dioda rozsvítí, v opačném případě je zhasnutá. Části algoritmu zabývající se motorem jsou na obrázku 3.5 znázorněny zelenou barvou.



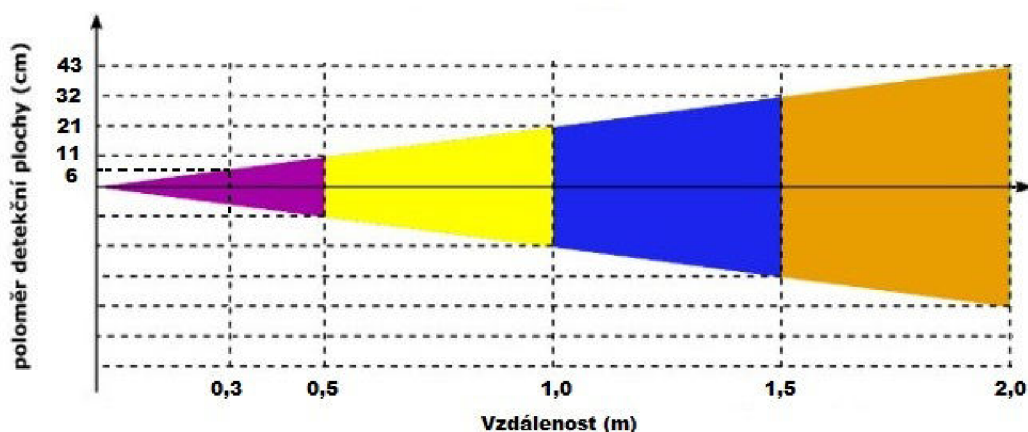
Obr. 3.5: Vývojový diagram programu

## 4 Výsledky

### 4.1 Zpracování naměřených hodnot vzdáleností

Pohyb zařízení je řízen hodnotou vzdálenosti, která vzniká průměrováním pěti aktuálních vzorků reálně naměřené vzdálenosti. To má za následek, že se reálná vzdálenost a vypočtená vzdálenost, použitá k řízení motoru, liší. Důvodem průměrování je zmírnění vlivu chybně změřených vzdáleností a zajištění plynulejšího pohybu. Při průměrování vzniká časové zpoždění přibližně 100 ms. Chyby v měření vzdálenosti vznikají při odrazu od měkkého materiálu, případně od objektu, který rychle mění směr a rychlost pohybu. Část těchto hodnot značně přesahuje dosah měření senzoru, tudíž je bylo možné nahradit nulovými hodnotami a ve výpočtu průměru je vynechat. Chybně naměřené hodnoty vyskytující se v dosahu senzoru jsou tedy korigovány průměrováním několika hodnot, čímž se docílí snížení jejich vlivu na aktuální pohyb motoru. Tabulka B.1 obsažená v přílohách uvádí možné odchylky původních a zpracovaných hodnot. K největším odchylkám dochází při větších změnách rychlosti pohybu tělesa. To se může projevit například při poruchách pohybu člověka.

Při měření vzdálenosti objektu představujícího hlavu pacienta bylo třeba zvážit také průměr detekční plochy. Lidská hlava, na kterou má být senzor zaměřen, má průměr přibližně 15 cm. Vzhledem k detekčnímu úhlu senzoru  $12^\circ$  je tak možné snímat hlavu vzdálenou méně než 1m, jak vyplývá z obrázku 4.1.

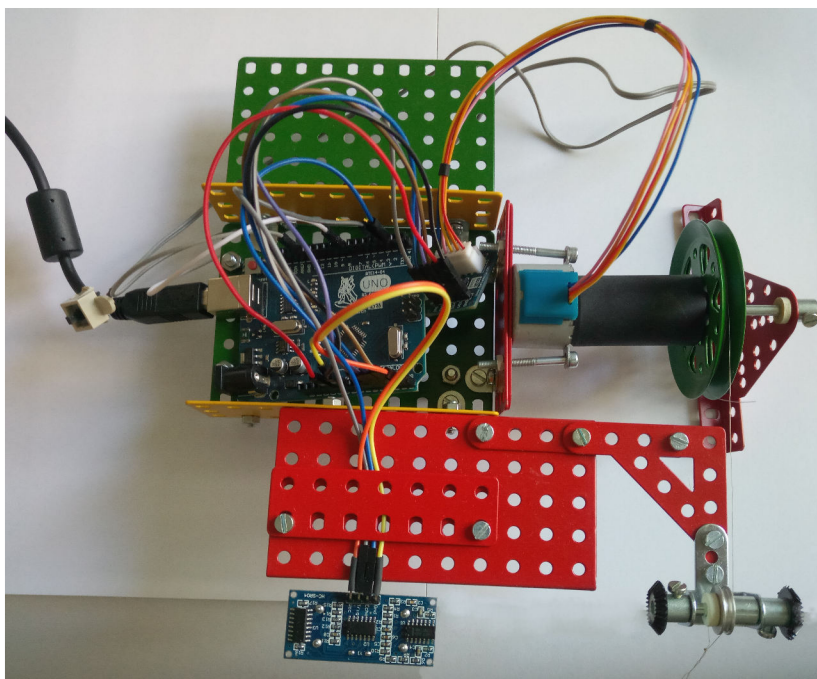


Obr. 4.1: Znázornění velikosti detekční plochy senzoru [38]

## 4.2 Popis konstrukce zařízení

Při konstrukci zařízení bylo třeba řešit vzájemnou polohu senzoru vzdálenosti a motoru. Jelikož bylo zařízení sestrojováno v domácích podmínkách, liší se vzhledově a částečně i funkčně oproti původně navrhovanému zařízení. Udržování konstantní vzdálenosti je v zjednodušeném modelu, ukazujícím funkčnost navrhovaného zařízení, demonstrováno pohybem závaží ve svislém směru zavěšeného na tenkém lanku.

Na obrázku 4.2 je vidět sestavené zařízení. Toto zařízení je částečně sestaveno ze stavebnice Merkur. Použité části vytváří vaničku, v níž je umístěna Arduino deska. K desce je připojen ultrazvukový senzor vzdálenosti, jehož přijímač i vysílač jsou obráceny směrem k zemi. Dále je na desku připojen krokový motor, jehož funkcí je udržování konstantní vzdálenosti závaží od detekovaného zkušebního objektu. Závaží na lanku je motorem navíjeno a odvíjeno v závislosti na pohybu pozorovaného objektu. Toto lanko je vedeno k motoru přes kladku, která zajišťuje, že se lanko s tělesem pohybuje v jedné ose s ultrazvukovým senzorem.



Obr. 4.2: Experimentální ověření návrhu na konstrukce ze stavebnice Merkur

## 4.3 Testování funkčnosti modelu zařízení

Pro testování bylo zařízení umístěno na hranu stolu ve výšce 82 cm nad podlahou. Celou dráhu pohybu závaží překoná za 24,4 s při nejvyšší dosažitelné rychlosti otá-

čení. Motor se točí pevně danou rychlostí 800 otáček za minutu s převodem 64:1, hřídel se tedy točí rychlostí 12,5 otáčky za minutu. Při větší rychlosti motoru dochází k občasným ztrátám kroku, což je nepřijatelné, protože je podle nich počítána poloha závaží na lanku. Rychlost pohybu závaží je tedy 3,4 cm/s.

Původně požadovanou rychlostí bylo 1,5 m/s. Vzhledem k tomu, že motor zdaleka nedosahuje takové rychlosti, nedochází přímo k udržení konstantní vzdálenosti od objektu, ale závaží na lanku je navíjeno a odvíjeno do polohy, ve které se zrovna detekovaný objekt nachází. Pohyb by bylo možné udělat plynulejším, pokud by se dopočítávala rychlost pohybu objektu a motor byl řízen touto rychlostí, ne polohou. Vzhledem k velmi nízké rychlosti se však tato výhoda příliš neprojeví.

Při odvíjení je pohyb méně plynulý než při navíjení, což může být způsobeno převodem v motoru. Byly byly vykoušeny dva stejné motory a u obou se projevilo stejné chování.

## Závěr

Předmětem této práce je návrh konstrukce zařízení použitelného k udržování konstantní vzdálenosti vůči pozorované osobě, například pro její snímání kamerou. Za tímto účelem byl proveden průzkum v oblasti bezkontaktního měření vzdálenosti a využití různých typů motorů pro návrh lineárního posuvu. Na základě nabytých poznatků a v korespondenci se zadáním byly vybrány konkrétní typy motorů (krokové motory) a ultrazvukový senzor vzdálenosti HC-SR04.

V rámci realizace zařízení byl vytvořen program, jehož první část se věnuje zpracování hodnot z ultrazvukového senzoru. V této části programu jsou eliminovány chybně naměřené hodnoty a konečná hodnota vzdálenosti je získávána průměrováním několika naměřených hodnot. Druhá část programu zajišťuje nastavení počáteční polohy a poslední část kódu obsluhuje pohyb motoru v závislosti na získané vzdálenosti z první části programu.

Vytvořený program byl otestován na sestrojeném modelu zařízení, který měl sloužit k ověření funkčnosti algoritmu. Z výsledků testování vyplývá, že vybraný motor je příliš pomalý, jeho maximální dosažená rychlost závaží je 3,4 cm/s, při vyšší rychlosti začíná ztrácet kroky. Lze předpokládat, že s rychlejším motorem, by zařízení konstantní vzdálenost od objektu udržovalo.

Dále bylo zjištěno, že senzor je uzpůsoben spolehlivě detekovat objekt stejného průměru jako pacientova hlava (15 cm) pouze na vzdálenost přibližně 70 cm.

Principiálně bylo tedy ověřeno, že navržené zařízení funguje. Bohužel práce v laboratoři se kvůli uzavření vysokých škol neposunuly a proto muselo dojít k ověření funkčnosti náhradním způsobem.

## Literatura

- [1] DAVID, Albert. *Direct Drive Linear Motors: Overview and Selection Process* [online]. Zaber Technologies, 2018 [cit. 2020-11-14]. Dostupné z URL: <[https://www.zaber.com/articles/direct\\_drive\\_linear-motors.pdf](https://www.zaber.com/articles/direct_drive_linear-motors.pdf)>
- [2] ŘEZÁČ, Kamil. *Krokové motory* [online]. 2002-10-28 [cit. 2020-11-17]. Dostupné z URL: <<https://robotika.cz/articles/steppers/cs>>
- [3] DOUGLAS W., Jones. *Stepping motors* [online]. The University of Iowa, Department of Computer Science [cit. 2020-11-17]. Dostupné z URL: <<http://homepage.divms.uiowa.edu/~jones/step/types.html>>
- [4] *Jak funguje přímý pohon EVBIKE?: Konstrukce BLDC* [online]. 2018-12-27 [cit. 2020-11-18]. Dostupné z URL: <<https://www.evbike.cz/a/jak-funguje-primy-pohon-evbike>>
- [5] *HDD BLDC Motor* [online]. [cit. 2020-11-18]. Dostupné z URL: <<https://www.electroschematics.com/hdd-blDC-motor>>
- [6] *Bezkartáčové stejnosměrné (BLDC) motory* [online]. 13. září 2019 [cit. 2020-11-18]. Dostupné z URL: <<https://www.elektroprumysl.cz/energetika/bezkartacove-stejnosmerne-blDC-motory>>
- [7] PEDERSEN, Jacob. *Model Based and Robust Control Techniques for Internal Combustion Engine Throttle Valves. 2013* Dostupné z URL: <[https://www.researchgate.net/figure/Model-of-a-brush-DC-motor\\_fig5\\_288617020](https://www.researchgate.net/figure/Model-of-a-brush-DC-motor_fig5_288617020)>
- [8] COLLINS, Danielle. *What is a commutator?* [online]. 7. ledna 2017 [cit. 2020-11-18]. Dostupné z URL: <<https://www.motioncontroltips.com/faq-what-is-the-commutator-in-a-dc-motor>>
- [9] SEUBERT, Curtis. *How Do Laser Distance Meters Work?* [online]. 25. dubna 2017 [cit. 2020-11-19]. Dostupné z URL: <<https://sciencing.com/do-laser-distance-meters-work-6332366.html>>
- [10] VOJÁČEK, Antonín. *Přesné optické měření velkých vzdáleností* [online]. 17. března 2014 [cit. 2020-11-19]. Dostupné z URL: <<https://automatizace.hw.cz/presne-opticke-mereni-velkych-vzdalenosti-i-pres-1-km-0>>

- [11] *Fotodioda* [online]. [cit. 2020-11-19]. Dostupné z URL:  
<[http://elektross.gjn.cz/soucastky/jeden\\_prechod/fotodioda.html](http://elektross.gjn.cz/soucastky/jeden_prechod/fotodioda.html)>
- [12] DOLEČEK, Jaroslav. *Moderní učebnice elektroniky* Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-184-5.
- [13] KOVAL, Ludvík, Jan VANUŠ a Petr BILÍK. *Distance Measuring by Ultrasonic Sensor* IFAC-PapersOnLine [online]. 2016, 49(25), 153 - 158 [cit. 2020-11-20]. Dostupné z URL:  
<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896316326623>>
- [14] *Ultrasonic Detection – Basics & Application* [online]. [cit. 2020-11-20]. Dostupné z URL:  
<<https://www.elprocus.com/ultrasonic-detection-basics-application/>>
- [15] GILLESPIE, Kristin. *Ultrasonic Sensors: Advantages and Limitations* [online]. 11-09-2019 [cit. 2020-11-20]. Dostupné z URL:  
<<https://www.maxbotix.com/articles/advantages-limitations-ultrasonic-sensors.htm/>>
- [16] *Eddy Current* [online]. [cit. 2020-11-22]. Dostupné z URL:  
<<http://acndt.com/services/eddycurrent.asp>>
- [17] *Advantages of Inductive sensor / Disadvantages of Inductive sensor* [online]. [cit. 2020-11-22]. Dostupné z URL:  
<<https://www.rfwireless-world.com/Terminology/Advantages-and-disadvantages-of-Inductive-Sensor.html>>
- [18] *Bezkontaktní měření vzdálenosti* [online]. [cit. 2020-11-22]. Dostupné z URL:  
<<https://www.mmspektrum.com/clanek/bezkontaktni-mereni-vzdalenosti.html>>
- [19] *Kapacitní senzory* [online]. [cit. 2020-11-24]. Dostupné z URL:  
<<http://www.eatonelektrotechnika.cz/kapacitni-senzory.html>>
- [20] MOERMOND, Jack. *What is a Capacitive Sensor?* [online]. [cit. 2020-11-24]. Dostupné z URL:  
<<https://automation-insights.blog/2017/06/07/what-is-a-capacitive-sensor/>>
- [21] *Inductive & Capacitive Proximity Sensor : Object Detector Circuit* [online]. 6. ledna 2019 [cit. 2020-11-24]. Dostupné z URL:  
<<https://how2electronics.com/inductive-capacitive-proximity-sensor/>>



- [22] *Optimization (How Capacitive Sensors Work and How to Use Them Effectively)* [online]. Lion Precision, 2012 [cit. 2020-11-24]. Dostupné z URL: <<https://www.lionprecision.com/capacitive-sensor-operation-and-optimization-how-capacitive-sensors-work-and-how-to-use-them-effectively/>>
- [23] WOLFF, Christian. *Radar Basics* [online]. [cit. 2020-11-26]. Dostupné z URL: <<http://www.radartutorial.eu/>>
- [24] COLLINS, Danielle. *What is cogging in linear motors?* [online]. 28.11.2017 [cit. 2020-12-29]. Dostupné z URL: <<https://www.linearmotiontips.com/what-is-cogging-in-linear-motors/>>
- [25] KIRSH, Danielle. *Types of linear motors* [online]. 8.12.2016 [cit. 2020-12-29]. Dostupné z URL: <<https://www.medicaldesignandoutsourcing.com/types-linear-motors/>>
- [26] *Overview of Different Piezo Motor Design Principles* [online]. [cit. 2020-12-29]. Dostupné z URL: <<https://www.pi-usa.us/en/tech-blog/overview-of-different-piezo-motor-design-principles/>>
- [27] *How do piezo motors work?* Xeryon [online]. [cit. 2020-12-29]. Dostupné z URL: <<https://xeryon.com/technology/how-do-piezo-motors-work/>>
- [28] KELEMEN, Michal, Ivan VIRGALA, Tatiana KELEMENOVÁ, Lubica MIKOVÁ, Peter FRANKOVSKÝ, Tomáš LIPTÁK a Milan LÖRINC. Distance Measurement via Using of Ultrasonic Sensor. *Journal of Automation and Control* [online]. Technical University of Kosice, , 71-74 [cit. 2020-12-30]. Dostupné z URL: <<http://pubs.sciepub.com/automation/3/3/6/#Figure1>>
- [29] *Laser rangefinder* [online]. [cit. 2020-12-30]. Dostupné z URL: <[https://en.wikipedia.org/wiki/Laser\\_rangefinder](https://en.wikipedia.org/wiki/Laser_rangefinder)>
- [30] *Radar Imagery - Sending and Receiving Signals* [online]. [cit. 2020-12-30]. Dostupné z URL: <<http://www.e-missions.net/weather2/h151.html>>
- [31] *Radar* [online]. 28. ledna 2010 [cit. 2020-12-30]. Dostupné z URL: <<https://en.m.wikipedia.org/wiki/Radar#>>

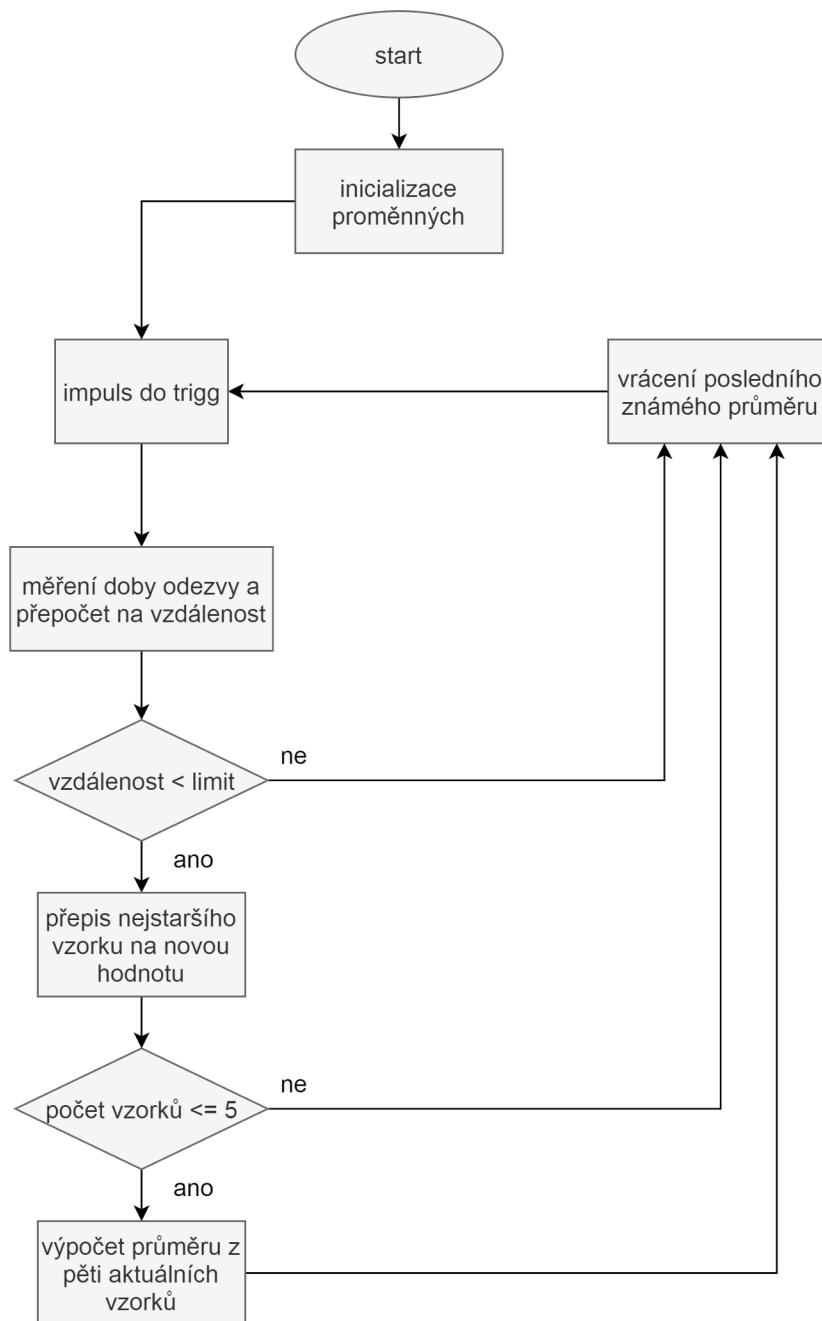
- [32] *Ultrazvukový senzor vzdálenosti HC-SR04 pro Arduino - 2cm do 400 cm* [online]. [cit. 2020-12-31]. Dostupné z URL:  
<<https://pajtech.cz/ultrazvukov-senzor-vzdlenosti-hc-sr04-pro-arduino-2cm-do-400-cm-p-8689.html>>
- [33] ElecFreaks Inc. *Ultrasonic Ranging Module HC - SR04* [online katalogový list]. [cit. 2021-01-01]. Dostupné z URL:  
<<https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Proximity/HCSR04.pdf>>
- [34] *Linear Induction Motor: Working Principle, Applications and Design* [online]. 28. října 2020 [cit. 2021-01-02]. Dostupné z URL:  
<<https://www.electrical4u.com/linear-induction-motor/>>
- [35] Arduino Uno. *Rse Electronics* [online]. [cit. 2021-01-05]. Dostupné z URL:  
<<https://www.rseonlineshop.co.za/products/arduino-uno>>
- [36] ARDUINO UNO REV3. *Arduino* [online]. [cit. 2021-01-05]. Dostupné z URL:  
<<https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3>>
- [37] *28BYJ-48 - 5V Stepper Motor* [online]. [cit. 2021-04-20]. Dostupné z URL:  
<<https://components101.com/motors/28byj-48-stepper-motor>>
- [38] *Ultrazvukový měřič vzdálenosti HC-04 pro jednodeskové počítače* Drátek.cz [online]. [cit. 2021-5-24]. Dostupné z URL:  
<[https://dratek.cz/arduino/846-eses-ultrazvukovy-meric-vzdalenosti-hc-04-pro-jednodeskove-pocitace.html?gclid=CjwKCAjwqIiFBhAHEiwANg9szvAG2zDI1UCpAkXGAy9QxjK1oPecM2wjb3\\_VLFq-j\\_0PGmuEBoCI4AQAvD\\_BwE](https://dratek.cz/arduino/846-eses-ultrazvukovy-meric-vzdalenosti-hc-04-pro-jednodeskove-pocitace.html?gclid=CjwKCAjwqIiFBhAHEiwANg9szvAG2zDI1UCpAkXGAy9QxjK1oPecM2wjb3_VLFq-j_0PGmuEBoCI4AQAvD_BwE)>
- [39] *Stepper(steps, pin1, pin2, pin3, pin4)*. Arduino [online]. [cit. 2021-5-27]. Dostupné z URL:  
<<https://www.arduino.cc/en/Reference/StepperConstructor>>

# Seznam příloh

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>A</b> | <b>Vývojové diagramy softwaru</b>             | <b>43</b> |
| A.1      | Vývojový diagram měření vzdálenosti . . . . . | 43        |
| A.2      | Vývojový diagram kalibrace motoru . . . . .   | 44        |
| A.3      | Vývojový diagram řízení motoru . . . . .      | 45        |
| <b>B</b> | <b>Tabulka hodnot vzdáleností UZ</b>          | <b>46</b> |
| <b>C</b> | <b>Konstrukce navrženého zařízení</b>         | <b>48</b> |

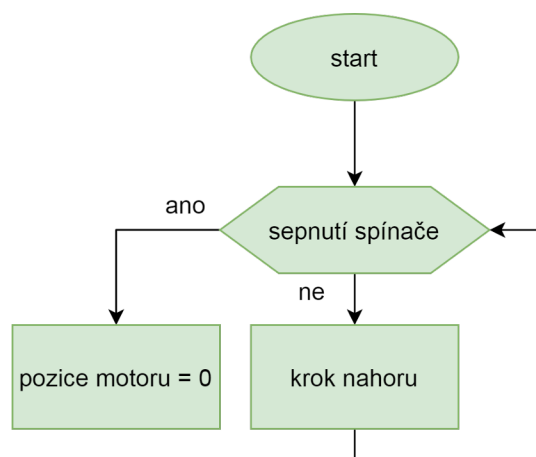
# A Vývojové diagramy softwaru

## A.1 Vývojový diagram měření vzdálenosti



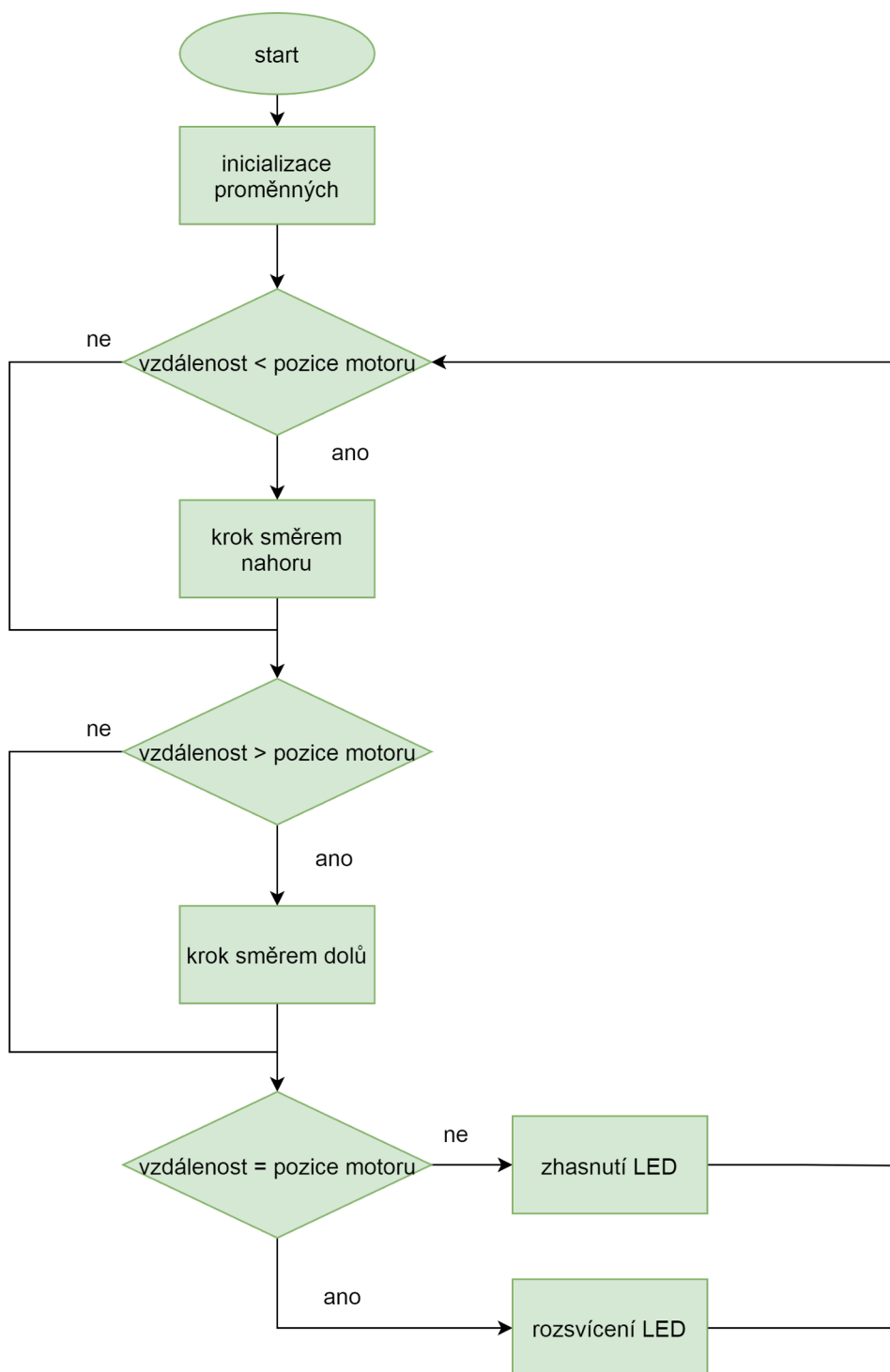
Obr. A.1: Vývojový diagram měření vzdálenosti

## A.2 Vývojový diagram kalibrace motoru



Obr. A.2: Diagram kalibrace pozice motoru

### A.3 Vývojový diagram řízení motoru



Obr. A.3: Vývojový diagram řízení motoru

## B Tabulka hodnot vzdáleností UZ

Tab. B.1: Tabulka odchylek průměrovaných od skutečně naměřených hodnot

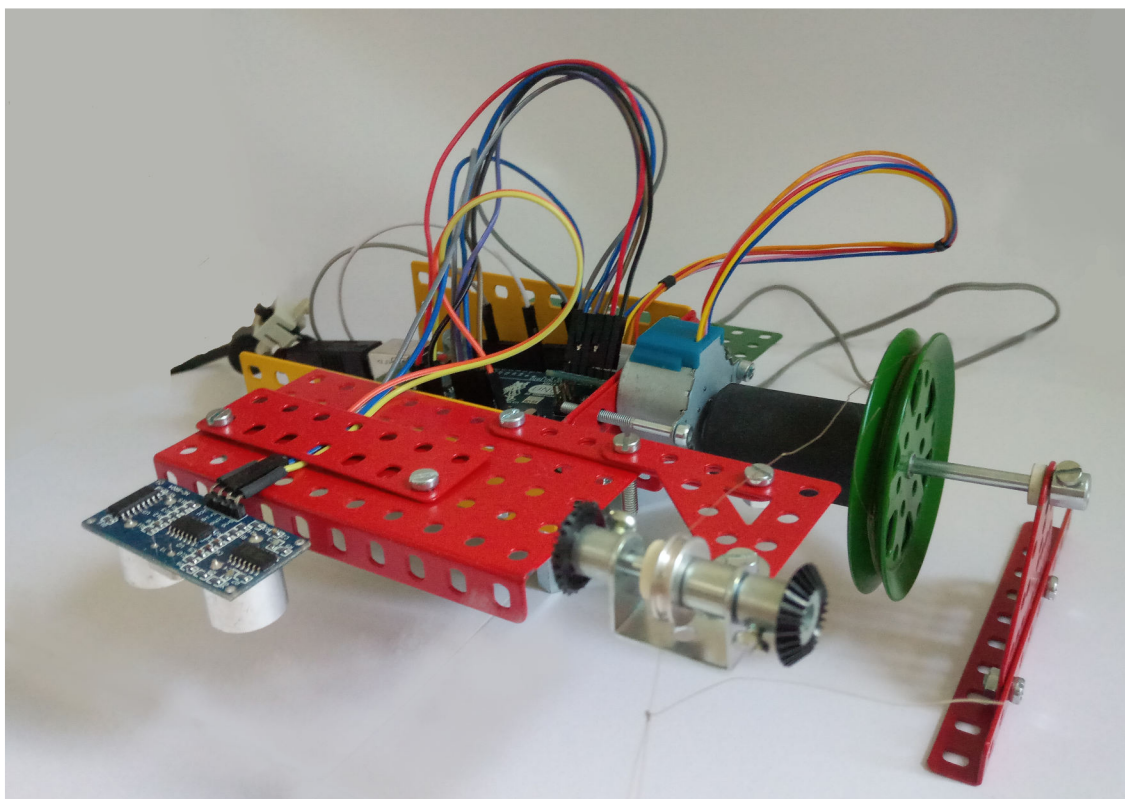
| Původně naměřené [cm] | průměrované [cm] | Absolutní odchylka [cm] | Relativní odchylka [%] |
|-----------------------|------------------|-------------------------|------------------------|
| 106                   | 106              | 0                       | 0,00                   |
| 106                   | 106              | 0                       | 0,00                   |
| 106                   | 106              | 0                       | 0,00                   |
| 106                   | 106              | 0                       | 0,00                   |
| 106                   | 106              | 0                       | 0,00                   |
| 105                   | 105              | 0                       | 0,00                   |
| 106                   | 105              | 1                       | 0,94                   |
| 105                   | 105              | 0                       | 0,00                   |
| 105                   | 105              | 0                       | 0,00                   |
| 105                   | 105              | 0                       | 0,00                   |
| 104                   | 105              | 1                       | 0,96                   |
| 103                   | 104              | 1                       | 0,97                   |
| 102                   | 103              | 1                       | 0,98                   |
| 102                   | 103              | 1                       | 0,98                   |
| 100                   | 102              | 2                       | 2,00                   |
| 99                    | 101              | 2                       | 2,02                   |
| 96                    | 99               | 3                       | 3,13                   |
| 95                    | 98               | 3                       | 3,16                   |
| 93                    | 96               | 3                       | 3,23                   |
| 92                    | 95               | 3                       | 3,26                   |
| 91                    | 93               | 2                       | 2,20                   |
| 88                    | 91               | 3                       | 3,41                   |
| 86                    | 90               | 4                       | 4,65                   |
| 84                    | 88               | 4                       | 4,76                   |
| 82                    | 86               | 4                       | 4,88                   |
| 80                    | 84               | 4                       | 5,00                   |

Tab. B.2: Tabulka odchylek průměrovaných od skutečně naměřených hodnot, pokračování

| Původně naměřené [cm] | průměrované [cm] | Absolutní odchylka [cm] | Relativní odchylka [%] |
|-----------------------|------------------|-------------------------|------------------------|
| 77                    | 81               | 4                       | 5,19                   |
| 75                    | 79               | 4                       | 5,33                   |
| 72                    | 77               | 5                       | 6,94                   |
| 70                    | 74               | 4                       | 5,71                   |
| 67                    | 72               | 5                       | 7,46                   |
| 66                    | 70               | 4                       | 6,06                   |
| 63                    | 67               | 4                       | 6,35                   |
| 61                    | 65               | 4                       | 6,56                   |
| 60                    | 63               | 3                       | 5,00                   |
| 57                    | 61               | 4                       | 7,02                   |
| 55                    | 59               | 4                       | 7,27                   |
| 52                    | 57               | 5                       | 9,62                   |
| 50                    | 54               | 4                       | 8,00                   |
| 48                    | 52               | 4                       | 8,33                   |
| 46                    | 50               | 4                       | 8,70                   |
| 44                    | 48               | 4                       | 9,09                   |
| 42                    | 46               | 4                       | 9,52                   |
| 40                    | 44               | 4                       | 10,00                  |
| 39                    | 42               | 3                       | 7,69                   |
| 37                    | 40               | 3                       | 8,11                   |
| 36                    | 38               | 2                       | 5,56                   |
| 34                    | 37               | 3                       | 8,82                   |
| 33                    | 35               | 2                       | 6,06                   |
| 32                    | 34               | 2                       | 6,25                   |
| 32                    | 33               | 1                       | 3,13                   |
| 30                    | 32               | 2                       | 6,67                   |
| 30                    | 31               | 1                       | 3,33                   |
| 29                    | 30               | 1                       | 3,45                   |
| 28                    | 29               | 1                       | 3,57                   |
| 27                    | 28               | 1                       | 3,70                   |
| 26                    | 28               | 2                       | 7,69                   |
| 26                    | 27               | 1                       | 3,85                   |



## C Konstrukce navrženého zařízení



Obr. C.1: Sestrojené zařízení, jiný pohled